



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN  
CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE  
THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS  
DE LA ESPOCH”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Tipo:** Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTORES:** FREIRE SILVA SERGIO VINICIO

REINEL VIERA JULIO ANDRÉS

**TUTOR:** ING. MABEL PARADA

Riobamba - Ecuador

2018

**©2018 Sergio Vinicio Freire Silva – Julio Andrés Reinol Viera**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

El Tribunal de trabajo de titulación certifica que, El trabajo técnico denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH”**, de responsabilidad de los señores Sergio Vinicio Freire Silva – Julio Andrés Reinol Viera, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

**FECHA**

**FIRMA**

Ing. Mabel Parada

**DIRECTOR DE TESIS**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Mayra Zambrano

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Riobamba, Junio 2018**

Nosotros, Sergio Vinicio Freire Silva – Julio Andrés Reinel Viera, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación. El patrimonio del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Sergio Vinicio Freire Silva**

**180479215-6**

---

**Julio Andrés Reinel Viera**

**150083772-7**

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Sergio Vinicio Freire Silva – Julio Andrés Reinel Viera, declaramos que el Trabajo de Titulación tipo Proyecto Técnico denominado: : “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH”, es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, junio del 2018

---

**Sergio Vinicio Freire Silva**

**180479215-6**

---

**Julio Andrés Reinel Viera**

**150083772-7**

## **DEDICATORIA**

A toda mi familia por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación y el cariño constante que me han ofrecido para ser una persona de bien en el transcurso de la vida, lo que me ha permitido cumplir uno de mis sueños tan anhelados.

Sergio Vinicio Freire Silva

Quizás cuando lean esto a algunos les parecerá un poco egocentrista, pero es mi forma de ser, así que por esta vez me dedicare a mí mismo este trabajo que tanto esfuerzo me costó, no solo por lo de estos últimos meses sino por lo de todos estos años, tuve que saltar muchos obstáculos y cambiar aspectos de mi vida que estaban mal, para no alargar este cuento quiero despedirme diciendo que el esfuerzo, las ganas, la capacidad y tal vez un poco de talento son míos, pero no lo hubiera logrado sin la gracia de Dios.

Yume ga mitai kara

Daijoubou Datte

Julio Andrés Reinél Viera

## AGRADECIMIENTO

Gracias ante todo a Dios por regalarme la vida, a mi madre por creer en mí , a mi esposa y a mi hija quienes me brindaron su apoyo incondicional en todo momento, a todos mis demás familiares y amigos que con sus palabras de aliento me ayudaron a terminar este paso muy importante de mi vida.

Sergio Freire

Quiero empezar agradeciendo a la vida, porque todas las cosas buenas y malas que me sucedieron tuvieron su razón de ser y hoy me han traído hasta donde he llegado.

Julio Olmedo Reinol Chila gracias por tus consejos y por tu apoyo incondicional, no olvido que siempre dices; existen dos caminos, el del bien y el del mal, tu veras por cuál de ellos te vas.

Catalina del Rosario Viera Cabeza nunca será suficiente para mí decirte en palabras lo mucho que te debo, no solo me diste la vida, sino que te empeñaste en salvármela, hoy soy lo que algún día sembraste, gracias por dejarme haciendo bolitas de papel y figuras sin sentido.

A todos mis hermanos aunque muchos estén lejos, sobre todo a mi hermano Esteban él tiene la capacidad de sacarme de mi zona de mal humor y volverme a meterme en ella con una rapidez increíble.

Quiero agradecer a esas personas que yo considero mis amigos y que a lo largo del tiempo se convirtieron en mi familia, gracias por esta gran aventura, no hubiera sido lo mismo sin ustedes, Fernando, Raquel, Saúl. Y al final pero no menos importante mi amigo Luis siempre me da ánimos desde lejos y unos consejos medios jodidos.

Silvana Lourdes Váscenez Gaibor nunca entenderé lo que viste en mí, quizás es eso que yo mismo no puedo ver aunque me mire todos los días al espejo, si la justicia fuera real te tocaría por lo menos el 60 % de mi título, voy a ser sincero de no ser por ti tal vez no hubiera logrado esto o me hubiese tomado mucho más tiempo, estoy empeñado de por vida contigo. Yo nunca hubiera visto el sol, sino me sacas de esa oscuridad.

Andrés Reinol

## ABREVIATURA

$\Delta p$	Caída de presión en el evaporador (KPa)
$\Delta P$	Caída de presión en la bomba (KPa)
$\Delta t$	Diferencia de temperatura del refrigerante (K)
$\Delta T$	Diferencia de temperatura del agua (K)
$\varepsilon$	Eficiencia térmica (%)
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
$C$	Razón de capacidad calorífica (KJ/s K)
$C_R$	Razón de capacidad calorífica del refrigerante (KJ/s K)
$C_A$	Razón de capacidad calorífica del agua (KJ/s K)
$C_{min}$	Razón de capacidad calorífica mínima (KJ/s K)
$cp$	Calor específico (KJ/Kg K)
LMTD	Diferencia Media Logarítmica de Temperatura (K)
$\dot{m}$	Flujo másico (Kg/h)
$P_1$	Presión 1 en el evaporador (KPa)
$P_2$	Presión 2 en el evaporador (KPa)
$Q$	Transferencia de calor real (W)
$Q_f$	Caudal con sistema de enfriamiento (l/h)
$Q_i$	Caudal sin sistema de enfriamiento (l/h)
$Q_{m\acute{a}x}$	Transferencia máxima de calor (W)
$t_1$	Temperatura del refrigerante a la entrada del evaporador (K)
$t_2$	Temperatura del refrigerante a la salida del evaporador (K)
$T$	Temperatura (K)
$T_1$	Temperatura del agua a la entrada del tanque (K)
$T_2$	Temperatura del agua a la salida del tanque (K)
$U$	Coeficiente global de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)
$h$	Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m <sup>2</sup> K)
$K$	Conductividad térmica (W/m K)
$h_g$	Entalpía del refrigerante a la salida del evaporador (KJ/Kg)
$h_f$	Entalpía refrigerante a la salida del condensador y a la entrada del evaporador (KJ/Kg)
$D_{SSI}$	Distancia de separación del serpentín Interno (cm)
$D_{SSE}$	Distancia de separación del serpentín externo (cm)
$Q_{H_2O}$	Flujo calorífico del agua (KJ/h)
$Q_L$	Entalpía del refrigerante (KJ/Kg)



$Q_{\max}$	Máxima transferencia de calor (W)
$N_{\text{vueltas}}$	Número de vueltas del serpentín
L	Longitud de la circunferencia del serpentín (cm)
SSE	Sin el sistema de enfriamiento.
CSE	Con el sistema de enfriamiento.
GWP	Potencial de calentamiento global (Global warming potential)
HSPF	Factor de rendimiento estacional de calefacción (Heating seasonal performance factor)
EER	Factor de eficiencia energética (Energy efficiency ratio)
COP	Coeficiente de eficiencia energética (Coefficient of performance)

## INDICE DE CONTENIDO

Páginas

RESÚMEN.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
CAPITULO I .....	1
1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.1 Identificación del Problema .....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	2
1.3 Línea base del Proyecto.....	2
1.3.1 Antecedentes del Laboratorio de Operaciones Unitarias .....	2
1.3.2 Estado actual de la Torre de Destilación de Thinner.....	3
1.3.3 Marco Conceptual.....	5
1.3.3.1 Torre de Destilación de Thinner.....	5
1.3.3.2 Intercambiador de calor.....	6
1.3.3.3 Sistema de enfriamiento .....	9
1.3.3.4 Transferencia de calor .....	12
1.3.3.5 Thinner .....	13
1.4 Beneficiarios directos e indirectos .....	14
1.4.1 Beneficiarios directos .....	14
1.4.2 Beneficiarios indirectos.....	14
CAPÍTULO II.....	15
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	15
2.1 General .....	15
2.2 Específicos .....	15
CAPÍTULO III .....	16
3. ESTUDIO TÉCNICO .....	16
3.1 Localización del proyecto.....	16
3.2 Ingeniería del Proyecto .....	17
3.2.1 Tipo de estudio .....	18
3.2.2 Métodos.....	18
3.2.3 Determinación de las Variables del proceso .....	19
3.2.3.1 Temperatura .....	19
3.2.3.2 Caudal.....	20

<b>3.2.4</b>	<b><i>Formulación de las Alternativas de Diseño para el Sistema de Enfriamiento.</i></b>	<b>21</b>
3.2.4.1	<i>Alternativa 1- Sistema de Enfriamiento con Refrigerante 404<sup>a</sup></i>	23
3.2.4.2	<i>Alternativa 2- Sistema de Enfriamiento con Refrigerante 134<sup>a</sup></i>	29
3.2.4.3	<i>Comparación de las características que presentan los refrigerantes</i>	36
3.2.4.4	<i>Tabla de datos del Sistema de Enfriamiento</i>	37
<b>3.2.5</b>	<b><i>Cálculos de Ingeniería y selección de materiales para el diseño y construcción del equipo</i></b>	<b>39</b>
3.2.5.1	<i>Diseño Térmico</i>	39
3.2.5.2	<i>Diseño Hidráulico</i>	48
3.2.5.3	<i>Diseño Mecánico</i>	49
3.2.5.4	<i>Tabla de resultados de los cálculos equipos</i>	54
<b>3.3</b>	<b><i>Proceso de Producción</i></b>	<b>56</b>
3.3.1	<i>Proceso de Destilación de thinner con el equipo actual</i>	56
3.3.2	<i>Toma de datos del equipo actual</i>	58
3.3.3	<i>Proceso de Destilación de thinner con la Implementación del Sistema de Enfriamiento</i>	59
3.3.4	<i>Instrucciones para el uso del equipo de sistema de enfriamiento</i>	61
3.3.5	<i>Validación del equipo</i>	62
3.3.6	<i>Eficiencia del proceso de destilación con y sin la implementación del sistema de enfriamiento</i>	64
3.3.7	<i>Análisis y discusión de resultados de la validación del equipo</i>	66
<b>3.4</b>	<b><i>Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria</i></b>	<b>66</b>
<b>3.5</b>	<b><i>Análisis de costos/ beneficio del proyecto</i></b>	<b>71</b>
3.5.1	<i>Costos de thinner recuperado</i>	71
3.5.2	<i>Costos de inversión</i>	72
<b>3.6</b>	<b><i>Cronograma de ejecución del proyecto</i></b>	<b>75</b>
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>76</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Componentes Químicos del Thinner.....	5
<b>Tabla 1-3:</b> Localización geográfica ESPOCH.....	16
<b>Tabla 2-3:</b> Datos de las variables de la torre de destilación de thinner SSE.....	20
<b>Tabla 3-3:</b> Cantidad utilizada para la práctica de verificación de la torre de destilación. ....	20
<b>Tabla 4-3:</b> Datos de las variables de la torre de destilación de thinner CSE. ....	21
<b>Tabla 5-3:</b> Cantidades utilizadas para la práctica de verificación de la torre de destilación thinner.....	21
<b>Tabla 6-3:</b> Resultados del Software de Simulación HONEYWELL con Refrigerante R404 <sup>a</sup> ..	23
<b>Tabla 7-3:</b> Propiedades del Refrigerante 404 <sup>a</sup> . ....	28
<b>Tabla 8-3:</b> Resultados del Software de Simulación HONEYWELL con Refrigerante R134 <sup>a</sup> ..	29
<b>Tabla 9-3:</b> Propiedades del Refrigerante 134 <sup>a</sup> .....	35
<b>Tabla 10-3:</b> Comparación de las características de los Refrigerantes. ....	36
<b>Tabla 11-3:</b> Datos de tubería de Cobre. ....	37
<b>Tabla 12-3:</b> Datos de capacidades caloríficas para el agua, cobre y R404 <sup>a</sup> .....	37
<b>Tabla 13-3:</b> Datos de conductividad térmica para el agua y cobre. ....	38
<b>Tabla 14-3:</b> Datos del coeficiente de convección para el agua y R404a. ....	38
<b>Tabla 15-3:</b> Datos para la construcción del tanque de acero inoxidable 304. ....	38
<b>Tabla 16-3:</b> Datos de temperatura de entrada y salida del fluido caliente y fluido frío. ....	38
<b>Tabla 17-3:</b> Datos de presión de entrada y salida para la bomba y el evaporador. ....	39
<b>Tabla 18-3:</b> Tabla de Resultados. ....	54
<b>Tabla 19-3:</b> Características físicas del thinner. ....	57
<b>Tabla 20-3:</b> Datos experimentales del caudal del producto y temperatura de condensación. ...	58
<b>Tabla 21-3:</b> Resultados obtenidos SSE y CSE. ....	66
<b>Tabla 22-3:</b> Composición del acero inoxidable. ....	67
<b>Tabla 23-3:</b> Componentes del refrigerante 404 <sup>a</sup> . ....	70
<b>Tabla 24-3:</b> Propiedades Físicas del Refrigerante 404 <sup>a</sup> .....	70
<b>Tabla 25-3:</b> Materiales para tanque de acero 304. ....	72
<b>Tabla 26-3:</b> Equipos. ....	73
<b>Tabla 27-3:</b> Químicos.....	73
<b>Tabla 28-3:</b> Mano de obra. ....	73
<b>Tabla 29-3:</b> Costos para operación del equipo. ....	74
<b>Tabla 30-3:</b> Recursos totales. ....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Torre de Destilación de Thinner Residual.....	4
<b>Figura 2-1:</b>	Torre de Destilación de Thinner.....	6
<b>Figura 3-1:</b>	Proceso del sistema de enfriamiento.....	10
<b>Figura 4-1:</b>	Tipos de Transferencia de calor.....	12
<b>Figura 1-3:</b>	Localización Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	17
<b>Figura 2-3:</b>	Construcción del Tanque Evaporador.....	50
<b>Figura 3-3:</b>	Torre de destilación de thinner, laboratorio de OO.PP. ....	56
<b>Figura 4-3:</b>	Sistema de Enfriamiento. ....	59
<b>Figura 5-3:</b>	Serpentín de Cobre. ....	67
<b>Figura 6-3:</b>	Aislante Térmico Poliuretano.....	68
<b>Figura 7-3:</b>	Refrigerante Utilizado – R404 <sup>a</sup> . ....	69

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1-3:</b> Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs Entropía ( $\text{KJ/Kg-K}$ ) del Refrigerante 404 <sup>a</sup> .....	27
<b>Gráfica 2-3:</b> Presión ( $\text{kPa}$ ) vs Entalpía ( $\text{KJ/Kg}$ ) del Refrigerante 404 <sup>a</sup> .....	27
<b>Gráfica 3-3:</b> Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs Entropía ( $\text{KJ/Kg-K}$ ) del Refrigerante 134 <sup>a</sup> .....	33
<b>Gráfica 4-3:</b> Presión ( $\text{kPa}$ ) vs Entalpía ( $\text{KJ/Kg}$ ) del Refrigerante 134 <sup>a</sup> .....	34
<b>Gráfica 5-3:</b> Proceso de destilación de Thinner.....	58
<b>Gráfica 6-3:</b> Proceso de destilación de Thinner con el sistema de enfriamiento. ....	60
<b>Gráfica 7-3:</b> Comparación de la temperatura de condensación SSE vs CSE. ....	63
<b>Gráfica 8-3:</b> Comparación de la temperatura de ebullición SSE vs CSE.....	64

## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A** Partes del sistema de refrigeración.
- Anexo B** Sistema de refrigeración completo.
- Anexo C** Visualización 3D – Vista lateral izquierda.
- Anexo D** Visualización 3D – Vista lateral derecha.
- Anexo E** Visualización 3D Equipo vista frontal.
- Anexo F** Condensador, Panel de control, Compresor.
- Anexo G** R404A, Residuos de thinner.
- Anexo H** Destilado SSE, Destilado CSE.
- Anexo I** Información del panel de control automático.
- Anexo J** Técnica de laboratorio.

## RESÚMEN

El objetivo de este trabajo de titulación fue diseñar y construir un sistema de enfriamiento para mejorar el rendimiento del proceso y la eficiencia de la torre de destilación de thinner del laboratorio de Operaciones Unitarias de la escuela de Ingeniería Química de la ESPOCH. Se inició con el diagnóstico del estado de la torre de destilación de thinner, donde se pudo observar el calentamiento del agua que pasa por los condensadores y la poca cantidad de destilado obtenido, para luego proceder con el diseño y construcción del sistema de enfriamiento de acuerdo a los requerimientos de la evaluación realizada por pruebas de laboratorio. Se planteó dos alternativas de diseño en base al tipo de refrigerante más eficiente durante el proceso de refrigeración y que sea amigable con el ambiente, se tomó en cuenta los refrigerantes 404<sup>a</sup> y 134<sup>a</sup> y por medio de un análisis de criterios se optó por la primera alternativa. El sistema de enfriamiento consta de un tanque de almacenamiento o evaporador construido con acero inoxidable 304, tuberías de cobre de 15 mm y láminas de aluminio para el condensador. Se utilizó un compresor y una bomba de ½ hp, un filtro hermético, también consta de un panel de control automático con un sensor de temperatura. Con la implementación del sistema de enfriamiento se obtuvieron resultados muy aceptables, al reducir la temperatura en los condensadores se logró un aumento del rendimiento en el proceso, anteriormente sin el sistema implementado se consiguió 3 litros de thinner recuperado en un periodo de tiempo de 15 horas y con la implementación del sistema se alcanzó la meta de triplicar el thinner recuperado en el mismo tiempo. En conclusión los parámetros de diseño fueron óptimos para resolver la deficiencia que presentaba el equipo destilador de thinner. Se recomienda trabajar únicamente con los refrigerantes 404<sup>a</sup> y 507, ya que cuentan con características similares para que el equipo funcione de manera correcta.

**Palabras clave:** <CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES>, <TORRE DE DESTILACION DE THINNER>, <SISTEMA DE ENFRIAMIENTO>, <REFRIGERANTE>, <LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS>, <RENDIMIENTO>, <EFICIENCIA>.



## **ABSTRACT**

The objective of this research was to design and build a cooling system to improve the work of the tinting tower of the Unit Operations laboratory of the School of Chemical Engineering of ESPOCH. To begin with, the state of the tinner distillation tower was diagnosed and then the cooling system was designed and constructed, complying with the information established in the evaluation carried out by laboratory tests. Two design alternatives were suggested based on the type of environmentally friendly refrigeration, refrigerants 404 and 134 were analyzed, but the former was used. The cooling system has a storage tank or evaporator built with 304 stainless steel, 15 mm copper pipes and aluminum sheets for the condenser. We used a compressor and a ½ hp pump, a hermetic filter, also automatic control paper with a temperature sensor. With the application of this cooling system very acceptable results were obtained. By reducing the temperature in the condensers an increase in the yield in the process was obtained. Before without applying this project three liters of tinner was recovered in a period of time of fifteen hours, but with the application of the system the goal of tripling the savings of tinner in the same time was reached. Finally, the design parameters were appropriate for the efficiency of the tinner distiller equipment. It is recommended to work only with refrigerants 404 and 507, these have similar characteristics so that the equipment works correctly.

**Keywords:** Exact and Natural Sciences, Tinner distillation tower, Cooling System, Refrigerant, Unitary Opreations Laboratory, Efficiencies, Performance.

## **CAPITULO I**

### **1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Identificación del Problema**

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo es una institución de Educación Superior, con su sede central en la ciudad de Riobamba, Panamericana Sur km 1 ½, misma que tiene a disposición varias carreras para la juventud estudiantil que llegan de diferentes partes del país, entre ellas la carrera de Ingeniería Química en la que se forma profesionales aptos para cualquier ámbito industrial.

En esta carrera se imparte cátedras como Operaciones Unitarias, Procesos Industriales, Transferencia de Calor, materias que para reforzar el conocimiento estudiantil se realizan prácticas de laboratorios haciendo uso de varios equipos a disposición. Entre estos equipos se detectó que el destilador de thinner no cuenta con un sistema de enfriamiento adecuado para que pueda realizar su función eficientemente.

El presente proyecto dará solución al problema que presenta la torre de destilación de thinner, al no contar con un sistema de enfriamiento exclusivo para este equipo, el cual es de mucha importancia en el ámbito práctico e investigativo dentro del laboratorio de Operaciones Unitarias.

Este proyecto pretende dar comodidad y facilidad al uso del equipo, al solventar que funcione de una forma más práctica y segura para los estudiantes, maestros, técnicos docentes, pasantes y cualquier otra persona que necesite o pueda utilizar el equipo.

Actualmente hay un desperdicio de agua que se desecha en los sumideros quedando estancada y contaminado el ambiente. La importancia de su construcción radica en la reutilización del agua que se consume en el uso del equipo y el aprovechamiento de la energía con la que sale el agua después de un proceso de intercambio de calor.

El presente trabajo desarrolla el diseño operacional para una torre de enfriamiento de agua en contracorriente a fin de ser implementada y adecuada dentro del Laboratorio de Operaciones

Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

## **1.2 Justificación del proyecto**

La ejecución de este proyecto se basa en que actualmente, se dispone de una torre de destilación de thinner para experimentación dentro del laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, sin embargo dicha torre opera sin enfriamiento, lo cual genera grandes pérdidas de calor, baja eficiencia en la obtención del destilado y dificultad en el control de las variables de proceso.

Para evitar que exista pérdida de energía, (principalmente en forma de calor) del proceso de destilación e incrementar la eficiencia de la operación, se propone el diseño y construcción de un sistema de enfriamiento para ser implementado en el equipo de destilación, logrando de esta manera mejorar ampliamente la finalidad de dicho equipo.

El diseño y construcción del sistema de enfriamiento será de gran importancia; ya que permite una aplicación intensa de los conocimientos de ingeniería para la solución de problemas prácticos, genera un mayor aporte en la realización de prácticas de laboratorio e investigaciones por parte de estudiantes y docentes, objetivo que se logra con la disponibilidad de equipos, herramientas e insumos de laboratorio.

Por este motivo se ha visto la necesidad del diseño y construcción del mencionado equipo para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH, para satisfacer los requerimientos dentro del laboratorio y así poder dar un adecuado manejo y utilización de equipos pilotos a los estudiantes.

## **1.3 Línea base del Proyecto**

### ***1.3.1 Antecedentes del Laboratorio de Operaciones Unitarias***

El laboratorio de Operaciones Unitarias es un laboratorio de los más importantes para la carrera de Ingeniería Química y para varias carreras de las ESPOCH, nos permite conocer cada uno de los equipos así como su respectivo funcionamiento y el tipo de operación unitaria que realiza con los cuales trabajaremos en el transcurso de la carrera y en nuestras futuras obligaciones como profesionales, específicamente en el transporte, adecuación y/o transformación de las

materias implicadas en un proceso químico o en una operación unitaria, modificando las condiciones de una determinada cantidad de materia a una forma más útil a nuestros fines.

El laboratorio cuenta con equipos de gran importancia para la formación académica de los estudiantes, ya que por medio de prácticas de laboratorio podemos manipular, utilizar, dar el funcionamiento de estos equipos y con esto orientar a los estudiantes de como desenvolverse en un futuro profesional, con un sin números de procesos industriales que se les presentara en el campo laboral.

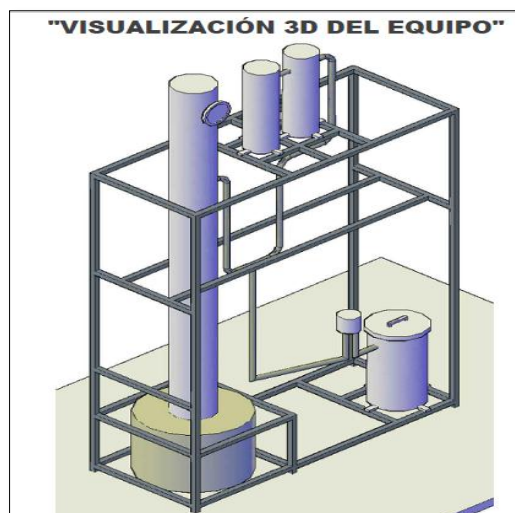
En el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se realizó una visita técnica para observar el prototipo de los elementos que tiene el laboratorio en mención. Se identificó cuáles son los elementos disponibles y así generar un diagnóstico de los equipos existentes, además con la encuesta al técnico docente del laboratorio hubo una mejor comprensión, como es el funcionamiento y manejo de las instalaciones en las que se llevará a cabo el proyecto.

Es así que el equipo llamado Torre de Destilación de Thinner muestra inconvenientes al momento de la refrigeración del vapor condensado, para lo cual se ideo nuevos procedimientos para reparar este problema y con esto se obtendrá un trabajo propicio para el equipo mencionado, lo que nos proporcionara un mejor rendimiento y eficiencia de la misma, por ende favorecerá a estudiantes y docentes que hagan uso del equipo con mejores condiciones.

### ***1.3.2 Estado actual de la Torre de Destilación de Thinner***

La torre de destilación de thinner está dividida en diversos platos donde el vapor que resulta de la ebullición del producto de alimentación, asciende hacia los condensadores por donde fluye agua y luego se transformara en líquido para poder descender hasta un tanque de almacenamiento, en este lugar se acumulará el thinner reciclado.

Como se puede apreciar en el párrafo anterior ese es el funcionamiento correcto del equipo de destilación de thinner, sin embargo en la actualidad no es así. La producción de thinner en este equipo se ha visto disminuida debido al deterioro de algunos elementos y materiales del mismo.



**Figura 1-1:** Torre de Destilación de Thinner Residual.  
**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

Lo que ha disminuido el trabajo efectivo de la máquina ha sido la baja capacidad de condensación y este es el punto más importante dentro de nuestro proceso ya que de ello dependerá tener mayor o menor cantidad de thinner recuperado, también encontramos irregularidades en las termocuplas las cuales no marcan la temperatura adecuada para el tipo de sustancia que se está destilando.

Otro desperfecto muy marcado que se encontró en la torre son las fugas de thinner y pérdidas de calor durante el proceso, estos dos motivos hacen que el equipo disminuya su capacidad de trabajo.

#### **Partes de la torre de destilación de Thinner**

- ✓ **Tanque de alimentación:** Parte del equipo destilador en el que se adiciona y contiene la materia prima que va ser tratada (residuos de thinner), mismo que será calentado hasta su punto de ebullición.
- ✓ **Estufa Industrial:** Permite el calentamiento del tanque de almacenamiento en donde reposa la materia prima para que pueda subir a los condensadores como vapor a alta temperatura.
- ✓ **Torre de platos:** Por esta parte del equipo sube el thinner como vapor hacia los condensadores.

- ✓ **Condensadores:** Son dispositivos que transforman el vapor en líquido, es decir el thinner recuperado, este es el punto más importante del proceso ya que los condensadores al no estar conectados a un sistema de enfriamiento no puede realizar su función correctamente provocando pérdidas de tiempo y materia prima.
- ✓ **Válvulas de descarga:** Al girar estas válvulas cada 20 minutos, luego de haber terminado el proceso de destilación, el líquido (thinner recuperado) comienza a caer a su tanque de almacenamiento.
- ✓ **Tanque de almacenamiento:** Es la parte final del equipo, en el cual se recoge el producto deseado (thinner recuperado), mismo que se debe colocar en recipientes idóneos para este tipo de hidrocarburos y finalmente será correctamente etiquetado para su análisis.

Previo a investigaciones de la tesis de grado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN CON RECTIFICACIÓN PARA LA PURIFICACIÓN DEL THINNER USADO PROCEDENTE DE LAS MECÁNICAS AUTOMOTRICES”, se encontró que la torre de destilación de thinner presentaba 93% de eficiencia, pero con el paso de los años y el modo de uso del equipo, al realizar el diagnóstico del mismo presentó deficiencia en el proceso de destilación.

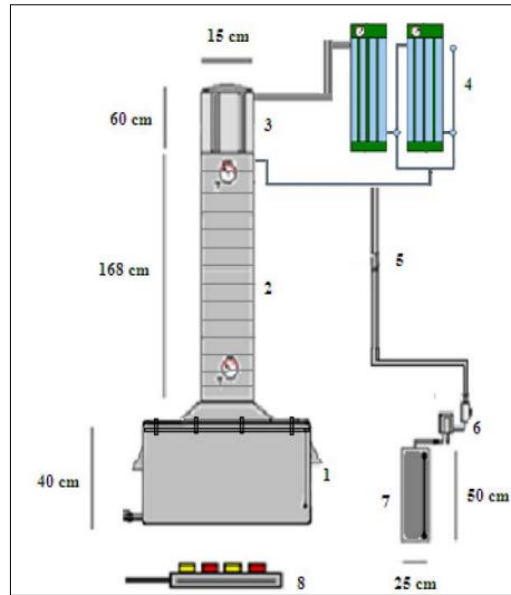
El caudal y temperatura de condensación no eran los idóneos para que el equipo pueda trabajar correctamente, por medio de ensayos de laboratorio se hizo la toma de los datos y al realizar los cálculos respectivos se encontró que la eficiencia del equipo era del 25%, razón por la que se consideró implementar un sistema de enfriamiento que pueda disminuir la temperatura de condensación en el proceso y aumentar el caudal del producto recuperado.

### ***1.3.3 Marco Conceptual***

#### ***1.3.3.1 Torre de Destilación de Thinner***

La torre de destilación de thinner es un equipo de gran importancia a nivel industrial y de laboratorio ya que al tener incorporado un sistema de rectificación permite la purificación del thinner usado procedente de las mecánicas, empresas carroceras, talleres de pintada de autos incluso carpinterías, lugares en donde es indispensable el uso de este compuesto como disolvente.

Este equipo tiene como finalidad recuperar thinner de una mezcla de residuos que en su momento iba a ser desechada. Con esto se logra que en los lugares mencionados tomen en cuenta la manera de reciclar mezclas para dar el respectivo tratamiento de recuperación y de esta manera poder reutilizarlo generando ahorros para la empresa y no contaminar el ambiente.



**Figura 2-1:** Torre de Destilación de Thinner.  
Fuente: Adriano, Valle, 2012, p.37

### 1.3.3.2 Intercambiador de calor

En varias situaciones a nivel industrial y de laboratorio nos encontramos con procesos físicos en los que es de gran importancia pasar calor desde un fluido; ya sea gas, líquido o vapor de elevada temperatura hasta uno de baja temperatura con distintas finalidades. Los intercambiadores de calor son dispositivos o equipos que nos ayudan a ejecutar dichas tareas (Gonzales, 2002, p.13).

Para comprender de mejor manera lo que ocurre en un proceso de intercambio de calor es necesario dar a conocer algunas definiciones de interés.

✓ Enfriador

Es un dispositivo en el cual una corriente intercambia calor con agua o aire sin que suceda cambio de fase en el proceso (GARCÍA, 2013, p. 94).

✓ Calentador

Un calentador es un dispositivo que también es un intercambiador de calor donde una corriente aumenta su entalpía, sin ningún cambio de fase. Se puede hacer uso de una corriente de servicio como fuente de calor, entre ellas puede ser; vapor de agua, aceite caliente, fluidos especiales o una corriente que halle en proceso de temperatura alta (Giménez Thomsen, 2007, p. 67-68).

✓ Refrigerador

Es un dispositivo que generalmente usa una sustancia de refrigeración para disminuir la temperatura de un fluido, hasta una temperatura menor que la obtenida, ya sea aire o agua como medio de enfriamiento. (Gonzales, 2002, p.1)

✓ Condensador de vapor

Dispositivo que permite convertir total o parcialmente los vapores de un proceso en líquido, con el uso de agua o aire como medio de enfriamiento (María, 2005, p. 69).

✓ Evaporador

Son intercambiadores diseñados para obtener mayor concentración de las soluciones acuosas, mediante la evaporación a elevadas temperaturas de una parte del agua que termina convirtiéndose en vapor (Gonzales, 2002, pp. 24).

✓ Vaporizador

Es un intercambiador que específicamente convierte líquido a vapor, haciendo uso de altas temperatura. Este equipo es empleado en mayor porcentaje en procesos que se maneja líquidos diferentes al agua (Gonzales, 2002, p.11).



## **Tipos de intercambiadores de calor:**

### **a) Según el proceso de transferencia:**

- **Contacto Directo:** Transfiere contacto directo entre dos corrientes en distintas fases (casi siempre es un gas y un líquido de bajísima presión de vapor) (Burbano, 2012, p.21).
- **Contacto Indirecto:** Ocurre cuando las corrientes permanecen separadas en el proceso y a través de una pared divisora se realiza la transferencia de calor (Gonzales, 2002, p.3).

### **b) Según los mecanismos de transferencia de calor:**

- **Convección en una sola fase, forzada o libre.**
- **Convección con cambio de fase, puede ser forzada o libre: condensación o ebullición.**
- **Combinación de convección y radiación** (Gonzales, 2002, p.4).

### **c) Según su construcción:**

- **Plato o Placas:** Este intercambiador contiene placas en lugar de tubos para lograr separar el fluido caliente y frío. Los dos fluidos se ubican alternadamente en cada una de las placas del intercambiador, permite transmitir mucho más calor con respecto a un intercambiador de carcasa y tubos (Jaramillo, 2007, pp. 3-4).
- **Carcasa y tubo:** Este tipo de intercambiadores tiene un contenedor denominado carcasa, en él se asientan un conjunto de tubos que permiten el paso del fluido interno, mismo que fluye interiormente por todo el conjunto de tubos, llamado fluido externo (Mendoza, 2016, pp. 11-12).

### **d) Según su operación o tipo de corriente:**

- **Flujo paralelo:** Los dos fluidos ingresan al dispositivo a diferente temperatura, pero al pasar por el intercambiador de calor, el fluido de mayor temperatura transfiere calor al fluido de menor temperatura (Jaramillo, 2007, p.5).
- **Flujo cruzado:** En esta operación uno de los fluidos se desplaza por el intercambiador de calor de manera perpendicular con respecto a la trayectoria del otro fluido, es decir, uno de los fluidos realiza su trayectoria entre los tubos, mientras que el otro fluido se dirige alrededor de los tubos formando un ángulo de  $90^\circ$  (Jaramillo, 2007, p.6).

- **Contraflujo:** En esta operación los fluidos utilizados para el proceso caliente y frio, ingresan por los extremos opuestos del intercambiador de calor y fluyen a través del dispositivo en dirección opuesta por el otro extremo (Jaramillo, 2007, p.5).

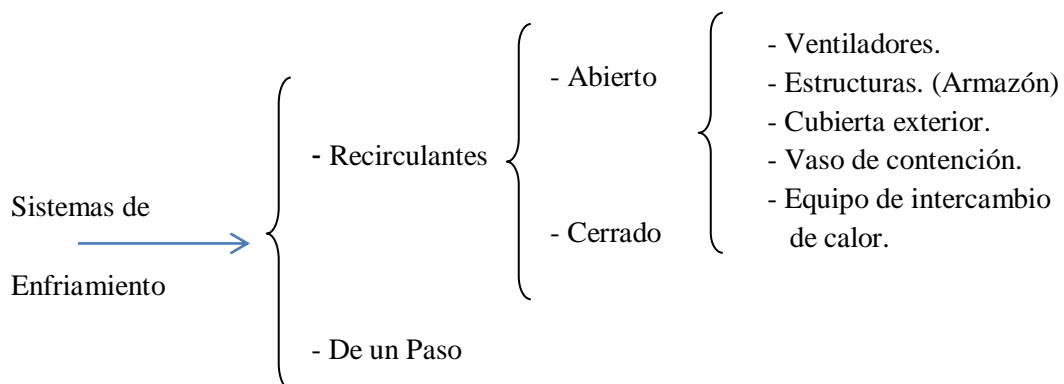
#### 1.3.3.3 Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento está compuesto por algunos componentes o dispositivos y fluidos que trabajan en conjunto para controlar temperatura altas que se generan en un proceso. Sabemos que el agua se puede encontrar en la naturaleza como ríos, arroyos, manantiales, lagos, pozos, etc., pero no es posible que pueda ser utilizada para todos los fines, es por esto que actualmente se está implementando sistemas de enfriamiento en equipos industriales logrando reutilizar grandes cantidades de agua (DOMÍNGUEZ, 1995, pp. 70).

El líquido fluye a través del sistema de enfriamiento soportando temperaturas muy elevadas, mismos que debe ser construido de materiales altamente resistentes a los choques térmicos de los fluidos y efectos corrosivos. Varios de estos factores han hecho que los sistemas de agua de enfriamiento sean cada vez más difíciles de conservar.

Debido a la gran cantidad de laboratorios que necesitan de la misma agua de reposición en los sistemas de enfriamiento, existe una gran contaminación química del agua así como cambios de la misma, incrementando la concentración de la sedimentación y de los sólidos en suspensión (Domínguez, 1995, pp. 73-74).

#### **Clasificación de los sistemas de enfriamiento:**

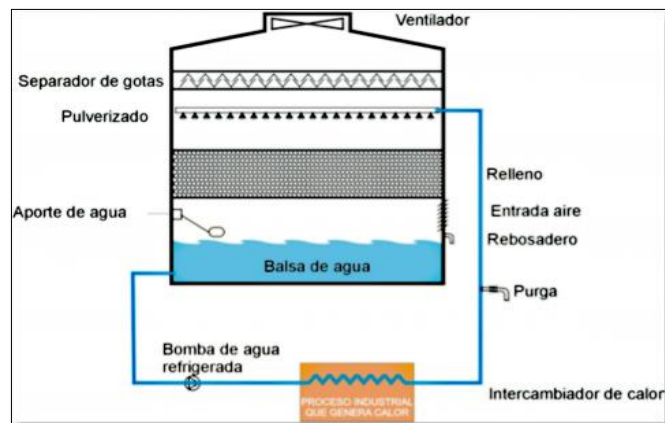


Para tener una mayor conservación de vida útil del sistema de enfriamiento es necesario trabajar con fluidos o líquidos que reúnan en lo posible las siguientes especificaciones:

- No debe ser corrosiva
- No debe formar incrustaciones
- No debe causar taponamiento ni depósitos orgánicos o inorgánicos en el equipo (Giménez Thomsen, 2007, p. 89).

### *Sistema de enfriamiento por compresión de vapor*

El proceso que ocurre en el equipo es inicialmente introduciendo agua por la cúpula de la torre por medio de vertederos o boquillas que realizan la distribución de agua en la superficie. El enfriamiento sucede cuando el agua cae a través de la torre para ponerse en contacto con una corriente de aire mismo que fluye a contracorriente o flujo cruzado a menor temperatura que la del agua. En estas condiciones este proceso se da por transferencia de masa llamado evaporación, con esto se puede notar que la temperatura del aire y su humedad van creciendo mientras que la temperatura del agua vaya disminuyendo (Mendoza, Gallardo, 2016, p. 27).



**Figura 3-1:** Proceso del sistema de enfriamiento.  
Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

### *Componentes de un Sistema de enfriamiento*

- Estructura:

La mayoría de los sistemas presentan estructuras resistentes para soportar instrumentación adicional en la carcasa; ya sea bombas, motores, ventiladores y demás componentes. La estructura utilizada para los sistemas de enfriamiento es de acero inoxidable asegurando largos periodos de vida útil (Paucar, Vivas, 1999, p. 24).

- Tanque de almacenamiento de agua:

Es la parte que mayor cuidado debe tener ya que permite el paso de agua hacia la torre y debe presentar algunas de las siguientes características:

- Dispersar el agua uniformemente.
- Soportar altas presiones y grandes volúmenes de agua.
- Resistente, capaz de operar por varios años. (Pauca, Vivas, 1999, p. 30)

- Compresor:

Comprime el refrigerante en forma de gas sobrecalentado. Este es un proceso a entropía constante y lleva el gas sobrecalentado de la presión de succión (ligeramente por debajo de la presión de evaporación) a la presión de condensación, en condiciones de gas sobrecalentado (Gallardo, 2016, p. 31).

- Ventilador:

Son implementados en la parte posterior del condensador para introducir y controlar el aire dentro de la misma, este puede ser de tipo axial y centrífugo, siendo el último el más utilizado (Gallardo, 2016, p. 29).

- Condensador:

Extrae el calor del refrigerante por medios naturales o artificiales (forzado). El refrigerante es recibido por el condensador en forma de gas y es enfriado al pasar por los tubos hasta convertir toda la masa refrigerante en líquido; su diseño debe garantizar el cumplimiento de este proceso, de lo contrario se presentarán problemas de funcionamiento (Puebla, 2005, p.25).

- Dispositivo de expansión:

Es el elemento que estrangula el flujo del líquido refrigerante para que ocurra caída súbita de presión obligando al líquido a entrar en evaporación. Puede ser una válvula de expansión o un tubo de diámetro muy pequeño en relación a su longitud (Puebla, 2005, p.25).

- Bomba de agua:

Este dispositivo es utilizado para llevar al líquido hacia la altura deseada, la más utilizada para equipos de laboratorio es la bomba de  $\frac{1}{2}$  Hp, con esta presión se puede elevar el líquido hasta una altura de 10 metros.

- Panel Eléctrico de Control:

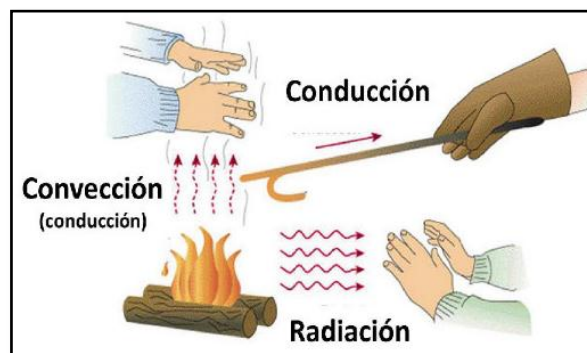
Permite tener el control de todo el sistema de enfriamiento, por medio de un dispositivo electrónico (controlador) se puede monitorear las variables que presenta el proceso, las cuales son, tiempo, volumen, temperatura entre otras.

#### 1.3.3.4 Transferencia de calor

La transferencia de calor está estrechamente relacionada con el intercambio de calor entre cuerpos de alta temperatura y baja temperatura, es decir; un cuerpo caliente también llamado fuente y otro cuerpo frío llamado receptor.

Por conocimientos previos sabemos que la transferencia de energía se da desde el cuerpo caliente hacia el cuerpo frío para tratar de llegar a un equilibrio entre las dos temperaturas.

(Burbano, 2014, p.17)



**Figura 4-1:** Tipos de Transferencia de calor.

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

La transferencia de calor también es una energía que transita debido a la diferencia de temperaturas de un mismo cuerpo o varios cuerpos. A continuación se dará una explicación de los tres tipos de transferencia de calor:

- ✓ Transferencia de calor por conducción:

En este tipo de transferencia las partículas se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, esto se debe al gran movimiento de las moléculas causando un impacto

directo como es el caso de los fluidos en reposo o arrastre de electrones como sucede con los metales (Burbano, 2014, p.18).

✓ Transferencia de calor por convección:

Es el método de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas) el cual se encuentra en movimiento. Cuando más rápido ocurre el movimiento de un fluido, la transferencia de calor por convección también será mayor, siendo directamente proporcional.

La transferencia de calor por convección se debe especialmente por el movimiento del fluido, puede ser de tipo: natural o libre y forzada. (Burbano, 2014, p.19).

✓ Transferencia de calor por radiación:

Mientras la transferencia de energía por conducción y conducción térmica se da solo a través de un medio natural, la radiación puede transportar calor sin la intervención de un medio incluso a través de vacío absoluto en forma de ondas electromagnéticas o fotones, y el calor energético puede ser transmitido por consecuencia de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas (Burbano, 2014, p.20).

#### *1.3.3.5 Thinner*

En algunos casos conocido con el nombre de diluyente, tiene como finalidad ser un adelgazador o rebajador de pinturas, este compuesto derivado del petróleo es una mezcla de disolventes de naturaleza orgánica ha sido diseñado para disolver, diluir o adelgazar sustancias insolubles en agua, como la pintura, aceites y grasas. (Adriano, Valle, 2012, p.6)

El Thinner, al igual que otros solventes, son sustancias peligrosas que atentan contra la vida humana al no ser utilizado de manera adecuada. Pueden producir daños al individuo que los respira incluso causar graves accidentes, como incendios (Adriano, Valle, 2012, p.7).

Componentes químicos:

**Tabla 1-1:** Componentes Químicos del Thinner.

Sustancia	Porcentaje (%)
Tolueno 5	50
Alcohol metílico 15	50
Cetonas 5	40
Hexano 5	30
Alcoholes 5	40
Xileno 5	20
Ésteres 3	50

**Realizado por:** Freire, S y Reinél, A. 2018.

#### **1.4 Beneficiarios directos e indirectos**

##### ***1.4.1 Beneficiarios directos***

Los principales beneficiarios de este proyecto serán exclusivamente los alumnos y docentes de la carrera de Ingeniería Química, de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, ya que gracias al sistema de enfriamiento se podrá poner en práctica los conocimientos teóricos impartidos en las cátedras a fin, que forman parte de la carrera de Ingeniería Química.

##### ***1.4.2 Beneficiarios indirectos***

Los beneficiarios indirectos serán todos los estudiantes, tesisistas y docentes de las diferentes carreras de la Facultad de Ciencias, grupos de investigación pertenecientes a la misma, gracias a que el equipo está diseñado y construido para fines práctico-investigativos y presenta facilidad de manejo.

## **CAPÍTULO II**

### **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **2.1 General**

Diseñar y construir un sistema de enfriamiento de agua con flujo en contracorriente para la torre de destilación de thinner del laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH.

#### **2.2 Específicos**

- Diagnosticar el estado actual en el que se encuentra el equipo de destilación de thinner para la implementación del sistema de enfriamiento de agua con flujo en contracorriente.
- Identificar las variables de operación para el sistema de enfriamiento con la toma de datos experimentales, a través de pruebas de ensayo.
- Dimensionar el sistema de enfriamiento con los respectivos cálculos de ingeniería.
- Implementar el sistema de enfriamiento de agua con flujo en contracorriente en el equipo de destilación de thinner.
- Validar el diseño y construcción del sistema de enfriamiento para la torre de destilación de thinner, mediante prácticas de laboratorio.



## CAPÍTULO III

### 3. ESTUDIO TÉCNICO

#### 3.1 Localización del proyecto

El proyecto será implementado en la Provincia de Chimborazo en la ciudad de Riobamba en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la Facultad de Ciencias en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química.

La ESPOCH se encuentra ubicada específicamente en la Panamericana Sur Km ½, de la ciudad de Riobamba.

**Tabla 1-3:** Localización geográfica ESPOCH

LÍMITES ESPOCH	<b>Norte:</b> limita con el barrio 24 de mayo y la Av. Canónigo Ramos. <b>Sur:</b> limita con la Av. Pedro Vicente Maldonado y el Barrio de los Maestros. <b>Este:</b> limita con la Av. 11 de Noviembre. <b>Oeste:</b> limita con la Av. By Pass.
Rango altitudinal	Está ubicada a 2754 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar).
Clima	Temperatura Promedio 15°C
Localización coordenadas Utm	17 M 758393.95 m E UTM 9817026.05 m S
Localización coordenadas geográficas	78°40'39.24" de longitud occidental y a 1°39'14.58" de latitud sur.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.



**Figura 1-3:** Localización laboratorio de Operaciones.

**Fuente:** Adaptado de Google Earth, 2018.

### 3.2 Ingeniería del Proyecto

Este proyecto tiene como finalidad implementar un sistema de enfriamiento de agua con flujo en contracorriente para la torre de destilación de thinner. Se recolectará información referente a equipos de sistemas de enfriamiento, que será obtenida a través de la investigación y consulta en libros, tesis, y páginas de internet referentes al tema.

- Se iniciará con la ejecución de un diagnóstico del estado actual de la torre de destilación de thinner, para conocer las principales dimensiones física, variables de operación y limitaciones de diseño, esto nos permitirá definir las opciones de diseño en los cálculos posteriores.
- Con los datos obtenidos de la caracterización de la operación de la torre de destilación se procederá a establecer posibles soluciones para la construcción e implementación del sistema de enfriamiento, considerando los procesos de transferencia de calor y masa que regirán al funcionamiento del sistema, modelos teóricos y modelos comerciales en operación.
- Una vez se haya identificado las variables de operación para el sistema de enfriamiento y se cuente con todos los datos experimentales necesarios; analizaremos la alternativa de diseño más adecuada para ser implementada en la torre de destilación de thinner, es decir en base a los cálculos de ingeniería especificar las dimensiones y condiciones de operación del sistema de enfriamiento. Posteriormente se procederá a la construcción

del sistema en base al diseño, tomando en cuenta algunas especificaciones de los materiales utilizados para la construcción del sistema de enfriamiento.

- Cuando la estructura del sistema de enfriamiento este completamente construida y terminada se instalara el equipo en el laboratorio de Operaciones Unitarias, para implementarlo con la torre de destilación de thinner, realizando las conexiones adecuadas para ponerlo en funcionamiento.
- Una vez que se haya armado el sistema de enfriamiento se procederá a la experimentación para medir las condiciones de operación y productos obtenidos, compararlo con las condiciones previas de operación de la torre y las especificaciones de diseño evaluar la eficiencia del sistema de enfriamiento.
- La parte final del proyecto corresponde a la validación del sistema de enfriamiento implementado en la torre de destilación de thinner, lo cual se realizará en el laboratorio de Operaciones Unitarias, junto con la colaboración de los tutores del proyecto, el técnico docente y los estudiantes de la carrera, a través de ensayos y prácticas de laboratorio.

### ***3.2.1 Tipo de estudio***

El diseño y construcción de un sistema de enfriamiento de agua con flujo en contracorriente, es un proyecto de tipo técnico, cuyo proceso se ha realizado a través del método deductivo, inductivo y experimental para obtener como resultado un equipo que aumente la eficiencia de la torre de destilación de thinner.

### ***3.2.2 Métodos***

Para la elaboración del diseño y construcción del sistema de enfriamiento de agua con flujo en contracorriente, se utilizaron los métodos deductivo, inductivo y experimental, para la recopilación de datos que fueron necesarios para la toma de decisiones y de esa manera realizar la correcta elaboración del equipo.

### ➤ Método Deductivo

Luego de conocer todos los problemas de funcionamiento del equipo y sabiendo cual tiene que ser nuestro enfoque primordial para mejorar la eficiencia de la torre procedemos a descartar varias de nuestras hipótesis y concentrarnos en las alternativas que más beneficiarían al proceso de condensación, en pocas palabras en este método se dará solución definitiva a la incógnita planteada.

### ➤ Método Inductivo

Se utilizó este método para visualizar el estado actual del equipo y tener un informe más detallado de cómo funciona la torre de destilación de thinner, cuál es su principal problema de funcionamiento y de qué manera se puede resolver dicha problemática. Se encontró que la mayor necesidad que tenía la máquina de destilación era la refrigeración en los condensadores.

Para resolver las interrogantes que nos habíamos planteados nos basamos en hipótesis de cómo se podía mejorar el problema en los condensadores y surgieron diferentes posibilidades de cuál sería el mejor tratamiento para acabar con la circulación de agua a temperaturas poco adecuadas para la condensación del thinner.

### ➤ Método Experimental

Se usó este método ya que se realizaron prácticas experimentales en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias, siguiendo métodos y técnicas adecuadas para la identificación de variables requeridas, necesarias para los cálculos y diseño del sistema de enfriamiento. Tomando debidos controles en el proceso de destilación de thinner, identificando puntos críticos en el proceso y asegurándose de que el producto deseado sea el correcto.

## **3.2.3 Determinación de las Variables del proceso**

### *3.2.3.1 Temperatura*

La temperatura es el aspecto más importante a considerar dentro de nuestro trabajo técnico de titulación ya que de esto dependerá el diseño adecuado del equipo de enfriamiento, se tomara en cuenta 4 temperaturas de entrada y salida, mismas que son; temperatura de entrada de fluido caliente, temperatura de salida de fluido caliente (agua), temperatura de entrada de fluido frio, temperatura de salida de fluido frio (refrigerante).

### 3.2.3.2 Caudal

El caudal es otra de nuestras variables importantes ya que de esto nos valemos para saber cuántos mililitros vamos a obtener por hora dentro del proceso de destilación de thinner, pero este no es el único caudal a tomar en cuenta, también tenemos otro muy importante que lo obtenemos por medio del cálculo de la potencia de la bomba, este caudal será el agua que transite por las mangueras de los equipos con un flujo en contracorriente.

#### ✓ Obtención de datos sin el sistema de enfriamiento

**Tabla 2-3:** Datos de las variables de la torre de destilación de thinner SSE.

T° Condensación (T°media) (°C)	t (min)	T° Ebullición (T°media) (°C)
16	20	40
16	20	66
16	20	81
19	20	82
21	20	83
22	20	89
22	20	89
24	20	89
27	20	89
26	20	90
29	20	91
29	20	89
29	20	90
29	20	92
30	20	96
30	20	98
<b>Cantidad Media</b>	22,18	84,62

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 3-3:** Cantidades utilizadas para la práctica de verificación de la torre de destilación.

Q (l/h)	Alimentación de residuos (l)	Volumen recuperado (l)
0,20	12	3

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

✓ **Obtención de datos con el Sistema de Enfriamiento**

**Tabla 4-3:** Datos de las variables de la torre de destilación de thinner CSE.

T° Condensación (T° media) (°C)	t (min)	T° Ebullición (T° media) (°C)
18	20	70
10	20	105
10	20	105
10	20	105
10	20	105
10	20	105
10	20	105
10	10	105
Cantidad Media	11	150
		100,63

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 5-3:** Cantidades utilizadas para la práctica de verificación de la torre de destilación thinner.

Q (l/h)	Alimentación de residuos (l)	Volumen recuperado (l)
0,60	12	9

Realizado por: Freire, S, Reinel, A. 2018

### 3.2.4 Formulación de las Alternativas de Diseño para el Sistema de Enfriamiento.

La torre de destilación de thinner desde su implementación en el laboratorio de Operaciones Unitarias ha sido de gran importancia para docentes y estudiantes de la facultad, fortaleciendo los conocimientos teóricos a través de prácticas de laboratorio con dicho equipo.

Antes de la ejecución de este proyecto de investigación, la alimentación para el agua de enfriamiento era por medio de un improvisado tanque de plástico en él posaba el agua que pasa

por los condensadores del destilador de thinner, mediante un flujo en contracorriente de agua haciendo una trayectoria de recirculación de manera directa y sin sistemas de control, lo cual, debido a la temperatura de la fase gaseosa dentro de la columna, el agua empezaba a calentarse dentro del tanque y en los condensadores provocando que no se genere la correcta condensación de dicho flujo, por tal razón, la eficiencia del equipo de purificación no era la correcta.

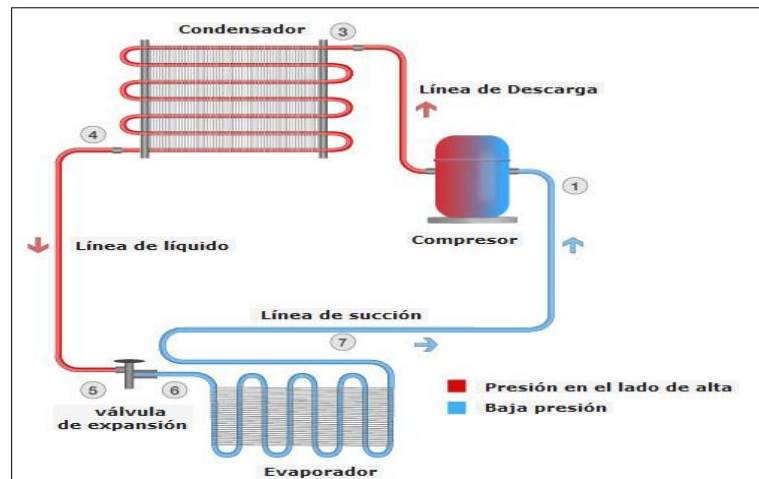
Analizando este inconveniente se optó por adecuar un sistema de enfriamiento de agua para el equipo mencionado, logrando disminuir la temperatura a través de un sistema de control eléctrico consiguiendo la condensación de la corriente de vapor hasta niveles razonables y con esto aumentar la eficiencia del destilador.

Con el uso del software llamado HONEYWELL de tipo libre, se analizó dos posibles alternativas para el diseño y construcción del sistema de enfriamiento y previo a investigaciones se encontró que se podía hacer uso de dos tipos de refrigerantes; 404<sup>a</sup> y 134<sup>a</sup>. Refrigerantes más recomendados y utilizados para un buen funcionamiento en los sistemas de enfriamiento de mediana y alta temperatura.

La simulación del proceso de Honeywell, es una herramienta digital que permite desarrollar, mejorar y reutilizar modelos de sistemas o equipos utilizados a nivel de laboratorios y plantas industriales. También ayuda a los ingenieros a crear y optimizar los diseños de plantas y monitorear el rendimiento de los mismos. De este modo, permite las operaciones estables y la seguridad de procesos en las plantas industriales.

### 3.2.4.1 Alternativa 1- Sistema de Enfriamiento con Refrigerante 404<sup>a</sup>

#### Simulación del software HONEYWELL con el Refrigerante 404<sup>a</sup>



**Figura 2-3:** Proceso de Sistema de Enfriamiento con R404<sup>a</sup>.

Realizado por: Freire. S, Reinel. A. 2018

**Tabla 6-3:** Resultados del Software de Simulación HONEYWELL con Refrigerante R404<sup>a</sup>.

Genetron Properties-Ciclo Básico Simplificado-R404A			
	Unidad	Valor	
Descripción	[--]	Refrigeración de media temperatura	
<b>DATOS DE ENTRADA</b>			
Evaporador Temperatura	[°C]	-25	
Evaporador Subenfriamiento a la salida	[°C]	5,6	
Línea de succión Datos de temperatura	[°C]	18	
Condensador Temperatura	[°C]	45	
Condensador Subenfriamiento a la salida	[°C]	5,6	
<b>PARÁMETRO DE DESEMPEÑO</b>			
Refrigerante	[--]	R404A	
Índice de GWP	[--]	3943	
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Capacidad volumétrica de enfriamiento	[kJ/m³]	1040,866	
Capacidad volumétrica de calefacción	[kJ/m³]	2179,682	
Capacidad de enfriamiento	[W]	1040865,51	
Capacidad de calefacción	[W]	2179681,74	
Potencia	[kW]	795,159	
Compresor Eficiencia isentrópica	[--]	0,7	
Compresor Eficiencia volumétrica	[--]	1	



Compresor Desplazamiento	[m³/s]	1	
COP de enfriamiento	[--]	1,309	
COP de calefacción	[--]	2,741	
EER	[Btu/W.h]	4,466	
HSPF	[Btu/W.h]	9,353	
Subenfriamiento a la entrada del dispositivo de expansión	[°C]	5,6	
Sobrecalentamiento a la salida del evaporador	[°C]	5,6	
Sobrecalentamiento a la entrada del compresor	[°C]	42,79	
Efecto de enfriamiento del refrigerante	[kJ/kg]	98,68	
Efecto de calefacción del refrigerante	[kJ/kg]	206,66	
Temperatura de condensación	[°C]	45	
Temperatura de evaporación	[°C]	-25	
<b>EVAPORADOR</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	-25,21	-19,19
Presión	[kPa]	249,6	249,6
Entalpía	[kJ/kg]	257,13	355,82
Entropía	[kJ/kg-K]	1,3085	1,706
Densidad	[kg/m³]	25,65	12,51
Calidad	[--]	0,499	1
Temperatura de saturación	[°C]	-25,21	-24,79
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Caída de presión	[kPa]	0	
Capacidad	[W]	1040865,51	
Sobrecalentamiento a la salida	[°C]	5,6	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Deslizamiento (glide) en el evaporador	[°C]	0,42	
<b>LÍNEA DE SUCCIÓN</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	-19,19	18
Presión	[kPa]	249,6	249,6
Entalpía	[kJ/kg]	355,82	388,4
Entropía	[kJ/kg-K]	1,706	1,8257
Densidad	[kg/m³]	12,51	10,55
Calidad	[--]	1	1
Temperatura de saturación	[°C]	-24,79	-24,79
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Cambio de presión en la línea	[kPa]	0	
Transferencia de calor	[W]	343657,52	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	

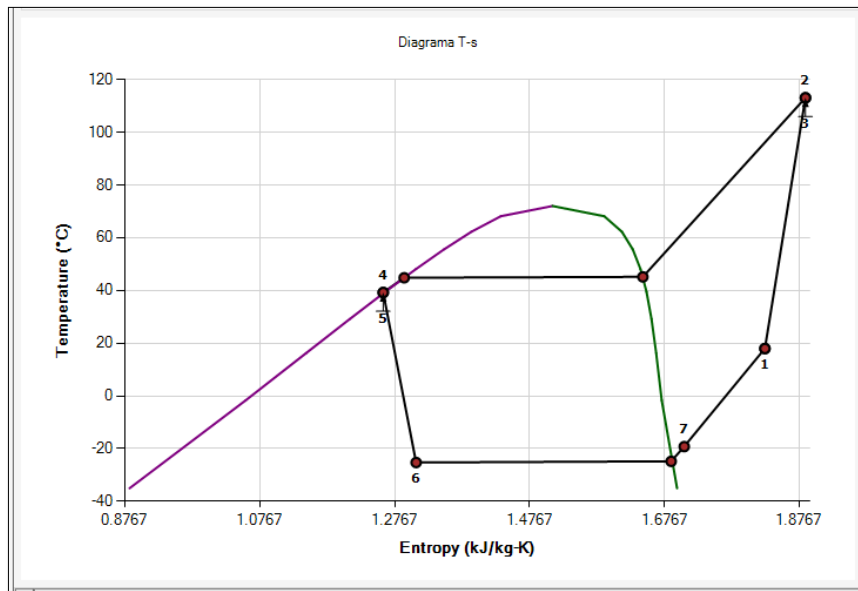
Cambio de temperatura en la línea	[°C]	37,19	
<b>LÍNEA DE DESCARGA</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	113,07	113,07
Presión	[kPa]	2051,8	2051,8
Entalpía	[kJ/kg]	463,79	463,79
Entropía	[kJ/kg-K]	1,8858	1,8858
Densidad	[kg/m³]	72,83	72,83
Calidad	[--]	1	1
Temperatura de saturación	[°C]	45,16	45,16
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Cambio de presión en la línea	[kPa]	0	
Transferencia de calor	[W]	0,01	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Cambio de temperatura en la línea	[°C]	0	
<b>LÍNEA DE LÍQUIDO</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	39,24	39,24
Presión	[kPa]	2051,8	2051,8
Entalpía	[kJ/kg]	257,13	257,13
Entropía	[kJ/kg-K]	1,2597	1,2597
Densidad	[kg/m³]	973,99	973,99
Calidad	[--]	0	0
Temperatura de saturación	[°C]	44,84	44,84
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Cambio de presión en la línea	[kPa]	0	
Transferencia de calor	[W]	0	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Cambio de temperatura en la línea	[°C]	0	
<b>COMPRESOR</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	18	113,07
Presión	[kPa]	249,6	2051,8
Entalpía	[kJ/kg]	388,4	463,79
Entropía	[kJ/kg-K]	1,8257	1,8858
Densidad	[kg/m³]	10,55	72,83
Calidad	[--]	1	1
Temperatura de saturación	[°C]	-24,79	45,16
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Desplazamiento	[m³/s]	1	

Consumo de potencia	[kW]	795,159	
Eficiencia volumétrica	[--]	1	
Eficiencia isentrópica	[--]	0,7	
Relación de compresión	[--]	8,2208	
<b>CONDENSADOR</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	113,07	39,24
Presión	[kPa]	2051,8	2051,8
Entalpía	[kJ/kg]	463,79	257,13
Entropía	[kJ/kg-K]	1,8858	1,2597
Densidad	[kg/m³]	72,83	973,99
Calidad	[--]	1	0
Temperatura de saturación	[°C]	45,16	44,84
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Caída de presión	[kPa]	0	
Capacidad	[W]	2179681,74	
Subenfriamiento a la salida	[°C]	5,6	
Sobrecalentamiento a la entrada	[°C]	67,92	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Deslizamiento (glide) en el condensador	[°C]	0,31	
<b>DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	39,24	-25,21
Presión	[kPa]	2051,8	249,6
Entalpía	[kJ/kg]	257,13	257,13
Entropía	[kJ/kg-K]	1,2597	1,3085
Densidad	[kg/m³]	973,99	25,65
Calidad	[--]	0	0,499
Temperatura de saturación	[°C]	44,84	-25,21
Flujo másico	[kg/s]	10,54739	
Caída de presión	[kPa]	1802,2	
Transferencia de calor	[W]	0	

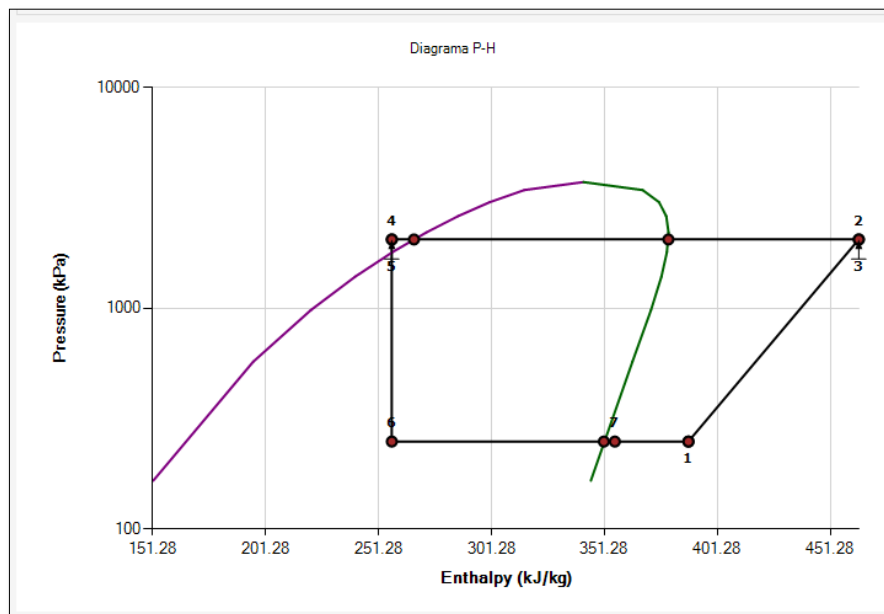
**Fuente:** Software de Simulación HONEYWELL con Refrigerante R404<sup>a</sup>.

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

✓ **Gráficas de resultados:**



**Gráfica 1-3:** Temperatura (°C) vs Entropía (KJ/Kg-K) del Refrigerante 404<sup>a</sup>.  
Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.



**Gráfica 2-3:** Presión (kPa) vs Entalpía (KJ/Kg) del Refrigerante 404<sup>a</sup>.  
Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Procesos que comprende el ciclo invertido de Carnot:**

- **Proceso 1-2:** El refrigerante absorbe calor isotérmicamente de una fuente a baja temperatura a  $T_L$  en la cantidad  $Q_L$ .
- **Proceso 2-3:** Se comprime isentropicamente hasta el estado 3 (la temperatura se eleva hasta  $T_H$ ).

- **Proceso 3-4:** Rechazo de calor isotérmicamente en un sumidero de alta temperatura a TH en la cantidad QH.
- **Proceso 4-1:** Se expande isentropicamente hasta el estado 1 (la temperatura desciende hasta TL).

### Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Vapor:

Procesos que experimenta el fluido en un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor:

- **Proceso 1-2:** Compresión isentrópica en un compresor.
- **Proceso 2-3:** Rechazo de calor a presión constante en el condensador.
- **Proceso 3-4:** Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.
- **Proceso 4-1:** Absorción de calor a presión constante en el evaporador.

**Tabla 7-3:** Propiedades refrigerante 404<sup>a</sup>.

T°	Presión	Densidad	Volumen	Energía interna	Entalpía	Entropía	Cv	Cp	Conductividad térmica
°C	kPa	kg/m³	m³/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg-K	kJ/kg-K	kJ/kg-K	mW/m-K
-25	247	12.77	0.0783	331.51	350.85	16.871	0.7315	0.8674	10.575
-20	247	12.42	0.0805	335.3	355.18	17.043	0.7356	0.8658	10.949
-15	247	12.11	0.0826	339.11	359.51	17.213	0.7406	0.8662	11.331
-10	247	11.81	0.0847	342.93	363.85	17.379	0.7463	0.868	11.718
-5	247	11.53	0.0867	346.77	368.2	17.543	0.7524	0.8707	12.111
0	247	11.27	0.0888	350.63	372.56	17.704	0.7589	0.8743	12.51
5	247	11.02	0.0908	354.52	376.94	17.863	0.7656	0.8785	12.915
10	247	10.78	0.0927	358.44	381.34	18.02	0.7726	0.8832	13.325
15	247	10.56	0.0947	362.38	385.77	18.175	0.7798	0.8884	13.741
20	247	10.35	0.0966	366.36	390.23	18.328	0.7872	0.894	14.161
25	247	10.15	0.0986	370.37	394.71	18.48	0.7947	0.9	14.587
30	247	9.95	0.1005	374.41	399.23	18.63	0.8023	0.9062	15.019
35	247	9.77	0.1024	378.49	403.78	18.779	0.8101	0.9126	15.455
40	247	9.59	0.1043	382.6	408.36	18.926	0.8179	0.9193	15.896
45	247	9.42	0.1061	386.75	412.97	19.072	0.8257	0.9261	16.342
50	247	9.26	0.108	390.94	417.62	19.217	0.8336	0.9331	16.792
55	247	9.1	0.1099	395.16	422.3	19.361	0.8415	0.9402	17.248
60	247	8.95	0.1117	399.43	427.02	19.504	0.8495	0.9473	17.708

Fuente: Genetron Properties, 2010.

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

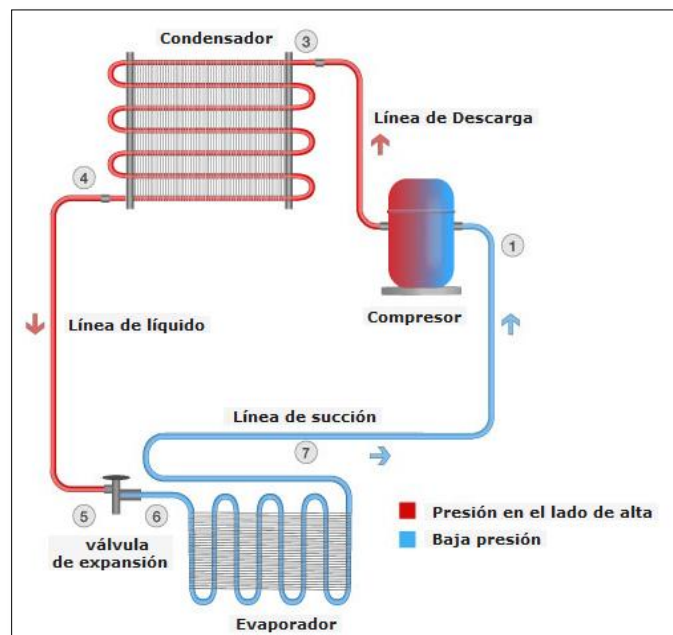
De esta tabla se tomó los datos de la temperatura a la cual iba a circular el refrigerante dentro del ciclo de compresión de vapor y en base a esto sacar las entalpías necesarias para los cálculos

del diseño térmico del equipo, es decir, la cantidad de calor que iba a perder el agua y el calor ganado por el refrigerante.

Se tomó también el dato de la capacidad calorífica, la cual era importante para el cálculo del flujo másico que iba a pasar a través de los componentes del equipo de refrigeración.

#### 3.2.4.2 Alternativa 2- Sistema de Enfriamiento con Refrigerante 134<sup>a</sup>

##### Simulación del software HONEYWELL con el Refrigerante 134<sup>a</sup>



**Figura 3-3:** Proceso de Sistema de Enfriamiento con R134<sup>a</sup>.  
Realizado por: Freire, S y Reinell, A. 2018.

**Tabla 8-3:** Resultados del Software de Simulación HONEYWELL con Refrigerante R134<sup>a</sup>.

Genetron Properties-Ciclo Básico Simplificado-R134A			
	Unidad	Valor	
Descripción	[--]	Refrigeración de media Temperatura	
<b>DATOS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN</b>			
Evaporador Temperatura	[°C]	-25	
Evaporador Sobrecalentamiento a la salida	[°C]	8	
Línea de succión Datos de temperatura	[°C]	18	
Condensador Temperatura	[°C]	45	
Condensador Subenfriamiento a la salida	[°C]	5,6	
<b>PARÁMETRO DE DESEMPEÑO</b>			
Refrigerante	[--]	R134A	
Índice de GWP	[--]	1300	
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Capacidad volumétrica de enfriamiento	[kJ/m³]	617,07	
Capacidad volumétrica de calefacción	[kJ/m³]	1144,841	
Capacidad de enfriamiento	[W]	617070,02	
Capacidad de calefacción	[W]	1144841,37	
Potencia	[kW]	396,117	
Compresor Eficiencia isentrópica	[--]	0,7	
Compresor Eficiencia volumétrica	[--]	1	
Compresor Desplazamiento	[m³/s]	1	
COP de enfriamiento	[--]	1,558	
COP de calefacción	[--]	2,89	
EER	[Btu/W.h]	5,315	
HSPF	[Btu/W.h]	9,861	
Subenfriamiento a la entrada del dispositivo de expansión	[°C]	5,6	
Sobrecalentamiento a la salida del evaporador	[°C]	8	
Sobrecalentamiento a la entrada del compresor	[°C]	43	
Efecto de enfriamiento del refrigerante	[kJ/kg]	134,35	
Efecto de calefacción del refrigerante	[kJ/kg]	249,26	
Temperatura de condensación	[°C]	45	
Temperatura de evaporación	[°C]	-25	
<b>EVAPORADOR</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	-25	-17
Presión	[kPa]	106,4	106,4
Entalpía	[kJ/kg]	255,49	389,84

Entropía	[kJ/kg-K]	1,2304	1,7714
Densidad	[kg/m³]	13,41	5,3
Calidad	[--]	0,408	1
Temperatura de saturación	[°C]	-25	-25
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Caída de presión	[kPa]	0	
Capacidad	[W]	617070,02	
Sobrecalentamiento a la salida	[°C]	8	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Deslizamiento (glide) en el evaporador	[°C]	0	
<b>LÍNEA DE SUCCIÓN</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	-17	18
Presión	[kPa]	106,4	106,4
Entalpía	[kJ/kg]	389,84	418,5
Entropía	[kJ/kg-K]	1,7714	1,8763
Densidad	[kg/m³]	5,3	4,59
Calidad	[--]	1	1
Temperatura de saturación	[°C]	-25	-25
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Cambio de presión en la línea	[kPa]	0	
Transferencia de calor	[W]	131653,87	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Cambio de temperatura en la línea	[°C]	35	
<b>LÍNEA DE DESCARGA</b>			
		entrada	Salida
Temperatura	[°C]	121,96	121,96
Presión	[kPa]	1159,9	1159,9
Entalpía	[kJ/kg]	504,75	504,75
Entropía	[kJ/kg-K]	1,9438	1,9438
Densidad	[kg/m³]	39,48	39,48
Calidad	[--]	1	1
Temperatura de saturación	[°C]	45	45
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Cambio de presión en la línea	[kPa]	0	
Transferencia de calor	[W]	0	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Cambio de temperatura en la línea	[°C]	0	
<b>LÍNEA DE LÍQUIDO</b>			
		Entrada	Salida



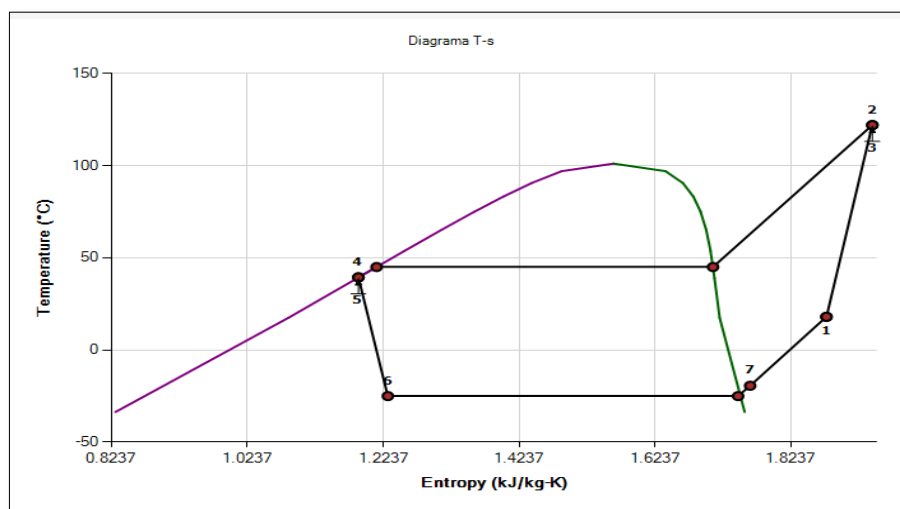
Temperatura	[°C]	39,4	39,4
Presión	[kPa]	1159,9	1159,9
Entalpía	[kJ/kg]	255,49	255,49
Entropía	[kJ/kg-K]	1,1871	1,1871
Densidad	[kg/m³]	1150,59	1150,59
Calidad	[--]	0	0
Temperatura de saturación	[°C]	45	45
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Cambio de presión en la línea	[kPa]	0	
Transferencia de calor	[W]	0	
Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Cambio de temperatura en la línea	[°C]	0	
<b>COMPRESOR</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	18	121,96
Presión	[kPa]	106,4	1159,9
Entalpía	[kJ/kg]	418,5	504,75
Entropía	[kJ/kg-K]	1,8763	1,9438
Densidad	[kg/m³]	4,59	39,48
Calidad	[--]	1	1
Temperatura de saturación	[°C]	-25	45
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Desplazamiento	[m³/s]	1	
Consumo de potencia	[kW]	396,117	
Eficiencia volumétrica	[--]	1	
Eficiencia isentrópica	[--]	0,7	
Relación de compresión	[--]	10,9016	
<b>CONDENSADOR</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	121,96	39,4
Presión	[kPa]	1159,9	1159,9
Entalpía	[kJ/kg]	504,75	255,49
Entropía	[kJ/kg-K]	1,9438	1,1871
Densidad	[kg/m³]	39,48	1150,59
Calidad	[--]	1	0
Temperatura de saturación	[°C]	45	45
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Caída de presión	[kPa]	0	
Capacidad	[W]	1144841,37	
Subenfriamiento a la salida	[°C]	5,6	
Sobrecalentamiento a la entrada	[°C]	76,96	

Caída de temperatura de saturación	[°C]	0	
Deslizamiento (glide) en el condensador	[°C]	0	
<b>DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN</b>			
		Entrada	Salida
Temperatura	[°C]	39,4	-25
Presión	[kPa]	1159,9	106,4
Entalpía	[kJ/kg]	255,49	255,49
Entropía	[kJ/kg-K]	1,1871	1,2304
Densidad	[kg/m³]	1150,59	13,41
Calidad	[--]	0	0,408
Temperatura de saturación	[°C]	45	-25
Flujo másico	[kg/s]	4,59293	
Caída de presión	[kPa]	1053,5	
Transferencia de calor	[W]	0	

**Fuente:** Genetron Properties, 2010.

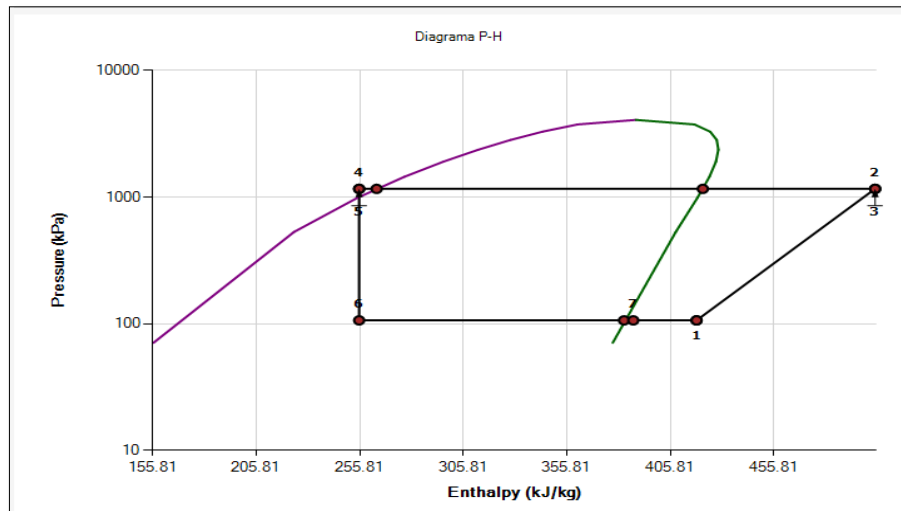
**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

### ✓ Gráficas de resultados:



**Gráfica 3-3:** Temperatura (°C) vs Entropía (KJ/Kg-K) del Refrigerante 134<sup>a</sup>.

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.



**Gráfica 4-3:** Presión (kPa) vs Entalpía (KJ/Kg) del Refrigerante 134<sup>a</sup>.  
**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

#### Procesos que comprende el ciclo invertido de Carnot:

- **Proceso 1-2:** El refrigerante absorbe calor isotermicamente de una fuente a baja temperatura a TL en la cantidad QL.
- **Proceso 2-3:** Se comprime isentropicamente hasta el estado 3 (la temperatura se eleva hasta TH).
- **Proceso 3-4:** Rechazo de calor isotermicamente en un sumidero de alta temperatura a TH en la cantidad QH.
- **Proceso 4-1:** Se expande isentropicamente hasta el estado 1 (la temperatura descende hasta TL).

#### Ciclo Ideal de Refrigeración por Compresión de Vapor:

Procesos que experimenta el fluido en un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor:

- **Proceso 1-2:** Compresión isentrópica en un compresor.
- **Proceso 2-3:** Rechazo de calor a presión constante en el condensador.
- **Proceso 3-4:** Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.
- **Proceso 4-1:** Absorción de calor a presión constante en el evaporador.

**Tabla 9-3:** Propiedades del Refrigerante 134<sup>a</sup>

<b>T°</b>	<b>Presión</b>	<b>Densidad</b>	<b>Volumen</b>	<b>Energía interna</b>	<b>Entalpía</b>	<b>Entropía</b>	<b>Cv</b>	<b>Cp</b>	<b>Conductividad térmica</b>	<b>Viscosidad</b>
°C	kPa	kg/m³	m³/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg-K	kJ/kg-K	kJ/kg-K	mW/m-K	μPa-s
-25	247	1373.84	0.0007	167.05	167.23	0.8744	0.8494	12.823	103.472	373.52
-20	247	1358.6	0.0007	173.49	173.67	0.9001	0.8551	12.927	101.129	348.06
-15	247	1343.1	0.0007	179.98	180.16	0.9254	0.8609	13.037	98.812	324.9
-10	247	1327.28	0.0008	186.52	186.71	0.9506	0.8669	13.154	96.518	303.73
-5	247	1311.13	0.0008	193.13	193.32	0.9754	0.8729	13.279	94.243	284.29
0	247	11.97	0.0835	379.29	399.92	17.446	0.7483	0.872	11.477	10.75
5	247	11.69	0.0855	383.14	404.27	17.604	0.7513	0.8703	11.871	10.96
10	247	11.43	0.0875	387.01	408.63	1.776	0.7557	0.871	12.266	11.17
15	247	11.18	0.0895	390.88	412.99	17.912	0.7612	0.8733	12.661	11.37
20	247	10.94	0.0914	394.78	417.36	18.063	0.7673	0.8768	13.058	11.57
25	247	10.72	0.0933	398.71	421.76	18.211	0.7738	0.8811	13.454	11.78
30	247	10.5	0.0952	402.66	426.17	18.358	0.7807	0.886	13.851	11.98
35	247	10.3	0.0971	406.64	430.62	18.504	0.7878	0.8913	14.249	12.18
40	247	10.11	0.0989	410.65	435.09	18.648	0.7951	0.897	14.646	12.38
45	247	9.92	0.1008	414.7	439.59	1.879	0.8025	0.9031	15.044	12.58
50	247	9.75	0.1026	418.78	444.12	18.931	0.81	0.9093	15.442	12.78
55	247	9.58	0.1044	422.89	448.68	19.072	0.8175	0.9157	15.841	12.97
60	247	9.42	0.1062	427.04	453.27	19.211	0.8252	0.9223	16.239	13.17

Fuente: Genetron Properties, 2010.

Realizado por: Freire, S y Reinell, A. 2018.

Esta tabla presenta las mismas propiedades del refrigerante anterior con datos y especificaciones diferentes ya que se trata de distintas composiciones en los refrigerantes, misma que no fue tomada en cuenta para los cálculos previos al diseño y construcción del equipo por ser la alternativa 1 la mejor opción para realizar el proyecto. (Véase los resultados en la Tabla 10-3: Comparación de las características de los Refrigerantes).

### ✓ Análisis de alternativas

Luego de haber establecido las alternativas se hizo el análisis de las mismas, valorando como elemento discriminante algunos criterios de selección establecidos. Como primer punto se verificó el cumplimiento de los criterios de selección por parte de cada una de las alternativas.

Al observar que las alternativas 1 y 2 satisfacen los criterios de selección, por esta razón se realizó la valoración del grado de cumplimiento de cada uno de los criterios establecidos para hacer uso del refrigerante más adecuado, valorando a cada alternativa con puntuaciones de 1 a 5. Si se cumplía con el criterio mínimamente, la valoración asignada fue cercana a 1, en tanto que si la alternativa cumplía satisfactoriamente con el criterio de selección, la valoración asignada fue cercana a 5, como se describe dentro de la tabla 15-3.

#### 3.2.4.3 Comparación de las características que presentan los refrigerantes

**Tabla 10-3:** Comparación de las características de los Refrigerantes.

Refrigerante 404 <sup>a</sup>		Refrigerante 134 <sup>a</sup>	
Criterio	Puntuación Rango (1-5)	Criterio	Puntuación Rango (1-5)
Ideal para trabajar con bajas y medias temperaturas.	5	Ideal para trabajar con altas temperaturas.	4
Baja toxicidad Índice de destrucción de la capa de ozono igual a 0.	5	Baja toxicidad.	5
Refrigerante más comercial para sistemas de enfriamiento.	5	Refrigerante más comercial para sistemas de congelamiento.	3
Fácil adquisición y menor precio.	5	Fácil adquisición mayor precio.	4
Mejora la eficiencia de condensación en el sistema de destilación.	4	Mejora la eficiencia de del sistema de destilación.	4
<b>TOTAL</b>	<b>24</b>	<b>TOTAL</b>	<b>20</b>

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

Al realizar el análisis de los resultado de la valoración de criterios de selección, se concluyó que la mejor alternativa está representada por el uso del refrigerante 404<sup>a</sup>, refrigerante que será el más apropiado para que el sistema de enfriamiento trabaje de la mejor manera en el proceso de destilación de thinner, en vista que también dicha alternativa presento una mejor valoración de sus criterios, en promedio, igual 24 puntos, en tanto que la segunda alternativa presentó una valoración promedio igual a 20 puntos, como me muestra dentro de la tabla.

Al realizar la simulación en el software del sistema de enfriamiento con cada uno de sus componentes, nos dimos cuenta que la alternativa 1 genera resultados más acertados para el tipo de proceso en el que va a ser empleado. Se observa que los resultados de la alternativa 1, son rangos de temperaturas medias, mientras que para la alternativa 2 presenta rango de temperaturas altas, siendo la opción 1 otra característica presente en el proceso de destilación con el sistema de enfriamiento.

Al ser una destilación de thinner, la temperatura de ebullición será de 65°C y para que este hidrocarburo suba a la parte alta de la torre, es decir, pueda ingresar a los condensadores como vapor, se maneja temperaturas de 110°C con un rango de desviación de  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Por ende dichos valores indican rangos medios de temperatura donde resulta más conveniente utilizar el refrigerante 404<sup>a</sup> presentado en la alternativa 1.

#### 3.2.4.4 Tabla de datos del Sistema de Enfriamiento.

**Tabla 11-3:** Datos de tubería de Cobre.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro externo	$\emptyset_{\text{externo}}$	0,016	m
Diámetro interno	$\emptyset_{\text{interno}}$	0,014	m
Radio externo	$r_{\text{externo}}$	0,008	m
Radio interno	$r_{\text{interno}}$	0,007	m
Espesor	e	0,001	m
Longitud	L	13,180	m
Área externa	$A_{\text{externa}}$	0,662	m <sup>2</sup>
Área interna	$A_{\text{interna}}$	0,580	m <sup>2</sup>
Altura del serpentín	$H_{\text{serpentín}}$	0,45	m
# de vueltas	$N_{\text{vueltas}}$	7	adimensional
Altura del serpentín	$H_{\text{serpentín}}$	0,45	m
# de vueltas	$N_{\text{vueltas}}$	7	adimensional

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 12-3:** Datos de capacidades caloríficas para el agua, cobre y R404<sup>a</sup>.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad calorífica $H_2O$	$C_p$	4,180	$\frac{KJ}{Kg. K}$
Capacidad calorífica Cobre	$C_p$	0,385	$\frac{KJ}{Kg. K}$
Capacidad calorífica Refrigerante 404A	$C_p$	0,87	$\frac{KJ}{Kg. K}$

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 13-3:** Datos de conductividad térmica para el agua y cobre.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Conductividad térmica $H_2O$	$K$	0,58	$\frac{W}{m. K}$
Conductividad térmica Cobre	$K$	385	$\frac{W}{m. K}$

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 14-3:** Datos del coeficiente de convección para el agua y R404a.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Coeficiente de convección $H_2O$	$h_o$	300	$\frac{W}{m^2. K}$
Coeficiente de convección Refrigerante 404A	$h_i$	20	$\frac{W}{m^2. K}$

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 15-3:** Datos para la construcción del tanque de acero inoxidable 304.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen	$V$	100	$l$
Diámetro externo	$\phi_{externo}$	0,52	$m$
Diámetro interno	$\phi_{interno}$	0,48	$m$
Radio externo	$r_{externo}$	0,26	$m$
Radio interno	$r_{interno}$	0,24	$m$

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 16-3:** Datos de temperatura de entrada y salida del fluido caliente y fluido frío.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
T° de entrada fluido caliente	$T_1$	40	°C
T° de salida fluido caliente	$T_2$	10	°C
T° de entrada fluido frío	$t_1$	-25	°C
T° de salida fluido frío	$t_2$	8	°C

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 17-3:** Datos de presión de entrada y salida para la bomba y el evaporador.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Presión de entrada de la bomba	$P_1$	40	Kpa
Presión de salida de la bomba	$P_2$	78	Kpa
Presión de entrada al evaporador	$P_1$	247	Kpa
Presión de salida del evaporador	$P_2$	769	Kpa

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

### 3.2.5 Cálculos de Ingeniería y selección de materiales para el diseño y construcción del equipo

Como primer punto tomamos en cuenta que para realizar el diseño del sistema de refrigeración se debe realizar los cálculos de ingeniería y obtener las condiciones de todos los componentes que estarán presentes en el equipo construido, mismos que se adaptarán a los requisitos de refrigeración. Es importante escoger materiales resistentes que pueda soportar tiempos de operación de 24 horas o más, dependiendo de la cantidad de producto que se desee obtener.

#### 3.2.5.1 Diseño Térmico.

##### ✓ Cálculos de las resistencias por convección y conducción

- Cálculo para la convección interna



$$R_i = \frac{1}{h \cdot A_i}$$

**Dónde:**

**h** = Coeficiente de transferencia de calor por convección, W/m<sup>2</sup> K

**A<sub>i</sub>** = Área interna de la tubería, m<sup>2</sup>

$$R_i = \frac{1}{20 \cdot 0,58}$$

$$R_i = 0,09 \frac{W}{K}$$

- Cálculo para la convección externa

$$R_e = \frac{1}{h \cdot A_e}$$

**Dónde:**

**h** = coeficiente de transferencia de calor por convección, W/m<sup>2</sup> K.

**A<sub>e</sub>** = área externa del serpentín, m<sup>2</sup>.

$$R_e = \frac{1}{300 \cdot 0,66}$$

$$R_e = 0,01 \frac{W}{K}$$

- Cálculo para la conducción en el espesor de la pared

$$R_o = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$$

**Dónde:**

**r<sub>o</sub>** = Radio externo del serpentín, m.

**r<sub>i</sub>** = Radio interno del serpentín, m.

**k** = Conductividad térmica del serpentín, W/m K.

**L** = Longitud del serpentín, m.

$$R_o = \frac{\ln \frac{0,008}{0,007}}{2 * \pi * 385 * 13,18}$$

$$R_o = 0,00001 \frac{W}{K}$$

- Cálculo de rapidez de transferencia de calor

$$q_x = \frac{\Delta T}{\Sigma RT}$$

**Dónde:**

**$\Delta T$**  = Diferencia de temperatura del agua, K.

**$\Sigma RT$**  = Sumatoria de las resistencias, W/K.

$$q_x = \frac{313 - 248}{0,09 + 0,01 + 0}$$

$$q_x = 650 \text{ W}$$

- Determinación de la diferencia media logarítmica de temperatura

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}$$

**Dónde:**

**$T_1$**  = Temperatura del agua a la entrada del tanque, °C.

**$T_2$**  = Temperatura del agua a la salida del tanque, °C.

**$t_1$**  = Temperatura del refrigerante a la entrada del evaporador, ° C.

**$t_2$**  = Temperatura del refrigerante a la salida del evaporador, ° C.

$$LMTD = \frac{(40 - 8) - (10 + 25)}{\ln \frac{(40 - 8)}{(10 + 25)}}$$

$$LMTD = 33,48 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

✓ **Calculo del diseño del evaporador**

- Cambio de entalpia del refrigerante

$$Q_L = h_g - h_f$$

**Dónde:**

$h_g$  = Entalpia del refrigerante a la salida del evaporador, KJ/Kg.

$h_f$  = Entalpia del refrigerante a la salida del condensador y a la entra del evaporador, KJ/Kg.

$$Q_L = 369,66 - 352,33$$

$$Q_L = 17,33 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

- Flujo térmico transferido

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

**Dónde:**

$\dot{m}$  = Flujo de agua al enfriar, Kg/h.

$C_p$  = Capacidad calorífica del agua, KJ/Kg K.

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura del agua, K.

$$\dot{Q}_{H_2O} = (79,98) * (4,180) * (313 - 283)$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = 10028,99 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

- Flujo másico del refrigerante

$$\dot{m}_{\text{ref}} = \frac{\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O}}}{Q_L}$$

**Dónde:**

$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O}}$  = Flujo calorífico del agua, KJ/h.

$Q_L$  = Entalpia del refrigerante, KJ/Kg.

$$\dot{m}_{\text{ref}} = \frac{10028,99}{17,33}$$

$$\dot{m}_{\text{ref}} = 578,71 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{ref}} = 578,71 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{ref}} = 0,16 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

- Coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{RT * A_e}$$

**Dónde:**

$RT$  = sumatoria de las resistencias, W/K

$A_e$  = área externa del serpentín, m<sup>2</sup>.

$$U = \frac{1}{0,66 * 0,10}$$

$$U = 15,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

- Superficie de transferencia de calor

$$A = \frac{Q}{U * LMTD}$$

**Dónde:**

**Q** = Rapidez de transferencia de calor, W.

**U** = Coeficiente global de transferencia de calor, W/m<sup>2</sup> K.

**LMTD** = Determinación de la diferencia media logarítmica de temperatura, °C.

$$A = \frac{650}{15,15 * 306,48}$$

$$A = 0,13 \text{ m}^2$$

#### ✓ Cálculo del rango de temperatura en el tanque

El cálculo para el rango de temperatura que recirculara dentro del tanque es la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del agua del tanque.

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

**Dónde:**

**T<sub>2</sub>** = Temperatura del agua a la salida del tanque, °C.

**T<sub>1</sub>** = Temperatura del agua a la entrada del tanque, °C.

$$\Delta T = (40 - 10)$$

$$\Delta T = 30 \text{ °C}$$

#### ✓ Cálculo del rango de temperaturas en el serpentín

Es la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido frío.

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

**Dónde:**

$t_2$  = Temperatura del refrigerante a la salida del evaporador, °C.

$t_1$  = Temperatura del refrigerante a la entrada del evaporador, °C.

$$\Delta t = (8 + 25)$$

$$\Delta t = 33 \text{ °C}$$

✓ **Transferencia máxima de calor**

Determinación de la razón de capacidad calorífica

$$C = \dot{m} * cp$$

**Dónde:**

$\dot{m}$  = Flujo másico del agua, Kg/h.

$cp$  = Calor específico del agua, KJ/Kg K.

- Capacidad Calorífica para el Agua

$$C_A = (79,98 * 4,18)$$

$$C_A = 334,32 \frac{\text{KJ}}{\text{h} * \text{K}}$$

- Capacidad Calorífica para el Refrigerante

$$C_R = (578,71 * 0,87)$$

$$C_R = 503,48 \frac{\text{KJ}}{\text{h} * \text{K}}$$

✓ **Determinación de la razón de capacidad calorífica mínima**

- Si  $C_A > C_R$

$$C_{\min} = C_R$$

- Si  $C_A < C_R$

$$C_{\min} = C_A$$

Entonces, al cumplirse la primera condición es decir,  $C_D > C_A$ , la razón de capacidad calorífica mínima es:

$$C_{\min} = 334,32 \frac{\text{KJ}}{\text{h} * \text{K}}$$

#### ✓ Cálculo de la transferencia máxima de calor

$$Q_{\max} = C_{\min} * (T_1 - t_1)$$

**Dónde:**

$C_{\min}$  = Razón de capacidad calorífica mínima, KJ/h K.

$T_1$  = Temperatura del agua a la entrada del tanque, K.

$t_1$  = Temperatura del refrigerante a la entrada del evaporador, K.

$$Q_{\max} = 334,32 * (313 - 248)$$

$$Q_{\max} = 21730,80 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$Q_{\max} = 21730,80 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1000\text{J}}{1\text{KJ}}$$

$$Q_{\max} = 6036,33 \text{ W}$$

#### ✓ Calculo de la Transferencia de Calor

- Determinación de la transferencia de calor real

$$\text{Si } C_A > C_R$$

$$Q = C_A (T_1 - T_2)$$

**Dónde:**

$C_A$  = Razón de capacidad calorífica del agua, KJ/ h K.

$T_1$  = Temperatura del agua a la entrada del tanque, K.

$T_2$  = Temperatura del agua a la salida del tanque, K.

- Si  $C_A < C_R$

$$Q = C_R (T_1 - T_2)$$

**Dónde:**

$C_R$  = Razón de capacidad calorífica del refrigerante, KJ/ h K.

$T_1$  = Temperatura del agua a la entrada del tanque, K.

$T_2$  = Temperatura del agua a la salida del tanque, K.

Entonces, al cumplirse la primera condición es decir,  $C_A > C_R$ , la transferencia de calor real es:

$$Q = 503,48 * (313 - 283)$$

$$Q = 15107,40 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$Q = 15107,40 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1000\text{J}}{1\text{KJ}}$$

$$Q = 4196,50 \text{ W}$$

#### ✓ Cálculo de la eficiencia térmica

Es la relación entre el calor que se transfiere en el equipo y el máximo valor que termodinámicamente es posible conseguirse.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\text{máx}}}$$



**Dónde:**

**Q** = Transferencia de calor real, W.

**Q<sub>máx</sub>** = Máxima transferencia de calor, W.

$$\varepsilon = \frac{4196,50}{6036,33} * 100$$

$$\varepsilon = 69,52 \%$$

### *3.2.5.2 Diseño Hidráulico.*

#### ✓ Caídas de presión en el evaporador

$$\Delta_p = P_2 - P_1$$

**Dónde:**

**P<sub>1</sub>** = Presión 1 en el Evaporador, KPa.

**P<sub>2</sub>** = Presión 2 en el Evaporador, KPa.

$$\Delta_p = 769 - 247$$

$$\Delta_p = 522 \text{ KPa}$$

#### ✓ Caídas de presión en la bomba

$$\Delta_p = P_2 - P_1$$

**Dónde:**

**P<sub>1</sub>** = Presión 1 en la Bomba, KPa.

**P<sub>2</sub>** = Presión 2 en la Bomba, KPa.

$$\Delta_p = 78 - 40$$

$$\Delta_p = 38 \text{ KPa}$$

- Potencia de la bomba

$$P = H_B * \rho * g * Q$$

**Dónde:**

**P** = Potencia, Hp.

**H<sub>B</sub>** = Altura de descarga, m.

**ρ** = Densidad del agua, Kg/m<sup>3</sup>

**g** = Gravedad, m/s<sup>2</sup>.

**Q** = Caudal, m<sup>3</sup>/s.

$$P = 2,93 * 998 * 9,8 * 3,2 \times 10^{-4}$$

$$P_{teórica} = \frac{9,17}{745}$$

$$P_{teórica} = 0,012$$

$$P_{real} = \frac{0,012}{0,85}$$

$$P_{real} = 0,014$$

$$P_{real} = 0,5 \text{ hp}$$

### *3.2.5.3 Diseño Mecánico.*

Para realizar el diseño mecánico se debe tener en cuenta el manejo de códigos y normas de equipos a presión. Es de gran importancia considerar las condiciones de operación, la presión y temperatura de los fluidos que intercambian calor en todo el sistema de enfriamiento.

#### **✓ Cálculo de la altura del tanque**

$$V = 100 \text{ litros}$$

$$V = \pi * r^2 * H$$

**Dónde:**

**V** = Volumen, cm<sup>3</sup>.

**r<sup>2</sup>** = Radio, cm<sup>2</sup>.

**H** = Altura, cm.

$$H = \frac{V}{\pi * r^2}$$

$$H = \frac{100000}{\pi * 24,25^2}$$

$$H = 55 \text{ cm}$$



**Figura 2-3:** Construcción del tanque evaporador.  
**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

#### ✓ Cálculo para Serpentín Interno

- Cálculo de la distancia de separación del serpentín Interno

$$D_{SSI} = \frac{H_{\text{espiral}}}{N_{\text{vueltas}}}$$

$$D_{SSI} = \frac{0,45}{7}$$

$$D_{SSI} = 6,4 \text{ cm}$$

- Cálculo del radio

$$r_i = \frac{D}{2}$$

**Dónde:**

**D** = Diámetro de la circunferencia del Serpentín Interno, cm.

**r<sub>i</sub>** = Radio, cm.

$$r_i = \frac{25}{2}$$

$$r_i = 12,5 \text{ cm}$$

- Cálculo de la longitud por vuelta

$$L_i = 2\pi r$$

**Dónde:**

**L<sub>i</sub>** = Longitud de la circunferencia del Serpentín Interno, cm.

**r** = Radio, cm.

$$L_i = 2\pi(12,5)$$

$$L_i = 78,54 \text{ cm}$$

- Cálculo Total de la Longitud del Serpentín Interno

$$L_{Total1} = L * n_{vueltas}$$

**Dónde:**

**L<sub>i</sub>** = Longitud de la circunferencia del Serpentín Interno, cm.

**N<sub>vueltas</sub>** = Numero de vueltas del Serpentín Interno dentro del Tanque Enfriador.

$$n_{vueltas} = 7$$

$$L_{Total1} = 78,54 * 7$$

$$L_{Total1} = 549,78\text{cm} = 5,49\text{m}$$

$$L_{\text{giro serpentín interno}} = \frac{5,49}{7} = 0,784\text{m}$$

$$L_{\text{giro}} = \pi * D_{\text{helice}}$$

$$D_{\text{helice}} = \frac{L_{\text{giro}}}{\pi}$$

$$D_{\text{helice}} = 0,24 \text{ m}$$

#### ✓ Cálculo para el Serpentín Externo

- Cálculo la distancia de separación del serpentín externo

$$D_{\text{SSE}} = \frac{H_{\text{espiral}}}{N_{\text{vueltas}}}$$

**Dónde:**

$H_{\text{espiral}}$  = Altura del espiral, m.

$N_{\text{vueltas}}$  = Numero de vueltas del espiral

$$D_{\text{SSE}} = \frac{0,45}{7}$$

$$D_{\text{SSE}} = 6,4 \text{ cm}$$

- Cálculo del Radio

$$r_e = \frac{D}{2}$$

**Dónde:**

$D$  = Diámetro de la circunferencia del Serpentín Externo, cm.

$r_e$  = Radio, cm.

$$r_e = \frac{35}{2}$$

$$r_e = 17,5 \text{ cm}$$

- Cálculo de la Longitud por Vuelta

$$L_e = 2\pi r$$

**Dónde:**

$L_e$  = Longitud de la circunferencia del Serpentín Externo, cm.

$r$  = Radio, cm.

$$L_e = 2\pi(17,5)$$

$$L_e = 109,96 \text{ cm}$$

- Cálculo Total de la Longitud del Serpentín Externo

$$L_{\text{Total}} = L * n_{\text{vueltas}}$$

**Donde:**

$L_e$  = Longitud de la circunferencia del Serpentín Externo, cm.

$N_{\text{vueltas}}$  = Numero de vueltas del Serpentín Externo dentro del Tanque Enfriador.

$$n_{\text{vueltas}} = 7$$

$$L_{\text{Total}} = 109,96 * 7$$

$$L_{\text{Total}} = 769,69 \text{ cm} = 7,69 \text{ m}$$

$$L_{\text{giro serpentín externo}} = \frac{7,69}{7} = 1,098 \text{ m}$$

$$L_{\text{giro}} = \pi * D_{\text{helice}}$$

$$D_{\text{helice}} = \frac{L_{\text{giro}}}{\pi}$$

$$D_{\text{helice}} = 0,24$$

### 3.2.5.4 Tabla de resultados de los cálculos equipos

**Tabla 18-3:** Tabla de Resultados.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
<b>DISEÑO TERMICO:</b>			
Convección Interna	$R_i$	0,09	$\frac{W}{K}$
Convección Externa	$R_e$	0,01	$\frac{W}{K}$
Conducción de espesor de la pared	$R_o$	0,0001	$\frac{W}{K}$
Rapidez de la transferencia de calor	$q_x$	650	W
Diferencia media logarítmica de temperatura	LMTD	33,48	°C
Flujo térmico transferido	$\dot{Q}_{H_2O}$	10028,99	$\frac{KJ}{h}$
Flujo másico del refrigerante	$\dot{m}_{ref}$	0,16	$\frac{Kg}{s}$
Entalpia del Refrigerante	$Q_L$	17,33	$\frac{KJ}{Kg}$
Coefficiente global de transferencia de calor	$U_{Gtc}$	15,15	$\frac{W}{m^2 * K}$
Superficie de transferencia de calor	$A_{tc}$	0,13	m <sup>2</sup>
Rango de temperatura del tanque	$\Delta T$	30	°C
Rango de temperaturas en el serpentín	$\Delta t_s$	33	°C
Transferencia máxima de calor	C	334,32	$\frac{KJ}{h * K}$
Capacidad Calorífica para el Agua	$C_A$	334,32	$\frac{KJ}{h * K}$
Capacidad Calorífica para el Refrigerante	$C_R$	503,48	$\frac{KJ}{h * K}$
Capacidad calorífica mínima	$C_{min}$	334,32	$\frac{KJ}{h * K}$
Transferencia máxima de calor	$Q_{m\acute{a}x}$	6036,33	W
Transferencia de calor real	Q	4196,50	W
Eficiencia térmica	$\epsilon$	69,52	%
Coefficiente de eficiencia	COP	1,309	-

energética.			
<b>DISEÑO HIDRÁULICO:</b>			
Caídas de presión en el evaporador	$\Delta_{pE}$	522	<i>KPa</i>
Caídas de presión en la bomba	$\Delta_{pB}$	38	<i>KPa</i>
Potencia teórica de la bomba	$P_{teórica}$	0,012	<i>hp</i>
Potencia real de bomba	$P_{real}$	0,5	<i>hp</i>
<b>DISEÑO MÉCANICO:</b>			
Distancia de separación del serpentín Interno	$D_{SSI}$	6,4	<i>cm</i>
Radio del serpentín Interno	$r_i$	12,5	<i>cm</i>
Longitud por vuelta del serpentín interno	$L_i$	78,54	<i>cm</i>
Distancia de separación del serpentín externo	$D_{SSE}$	6,4	<i>cm</i>
Radio del serpentín externo	$r_e$	17,5	<i>cm</i>
Longitud por vuelta del serpentín Externo	$L_e$	109	<i>cm</i>
Altura del tanque	$H$	55	<i>cm</i>
Volumen del tanque	$V$	100	<i>l</i>
Caudal sin sistema de enfriamiento	$Q_i$	0,20	$\frac{l}{h}$
Caudal con sistema de enfriamiento	$Q_f$	0,77	$\frac{l}{h}$

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.



### 3.3 Proceso de Producción

#### 3.3.1 Proceso de Destilación de thinner con el equipo actual



**Figura 3-3:** Torre de destilación de thinner, laboratorio de OO.PP.  
Realizado por: Freire, S y Reinol, A. 2018.

#### **Alimentación:**

La alimentación de los residuos de pinturas se da por medio de una válvula de bola de un cuarto de vuelta, acompañado de un embudo para evitar derrames del producto o para una mayor asertividad de la alimentación, también se puede desmontar el tanque del equipo y agregar los residuos.

#### **Calentamiento:**

En esta parte del proceso se expone al tanque un quemador de gas para que empiece el calentamiento (punto de ebullición) de la sustancia que se halla dentro del contenedor, luego se da comienzo a la separación y recuperación del thinner contenido en la mezcla de residuos de pintura.

### **Regulación de la temperatura:**

Una vez puesto a calentar el tanque de alimentación se procede a controlar la temperatura a la cual se va a separar nuestro thinner, para esto contamos con dos termocuplas integradas en el equipo que nos permiten ver cuál es la temperatura de ebullición y la de condensación. Según fichas técnicas industriales y nuestros datos obtenidos el thinner se va a separar a la temperatura comprendida entre 98 °C y 105 °C, esto dependerá mucho de la calidad del mismo y de los componentes que tenga en su estructura.

**Tabla 19-3:** Características físicas del thinner.

Propiedades	Valor
Estado físico	Líquido
Punto de inflamación	43 °C
Solubilidad en el agua	Insoluble
Densidad	0,7 – 0,8
Punto de ebullición	98 – 105 °C
Presión de vapor	0,3 kPa a 20 °C

**Fuente:** (GRUPO TRANSMERQUIN, 2016. (HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD)

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

### **Condensación:**

En esta fase el thinner circula en forma gaseosa por los condensadores los cuales se encargan de convertirlo a líquido nuevamente con la ayuda del agua que recircula desde un tanque a temperatura ambiente.

### **Reflujo:**

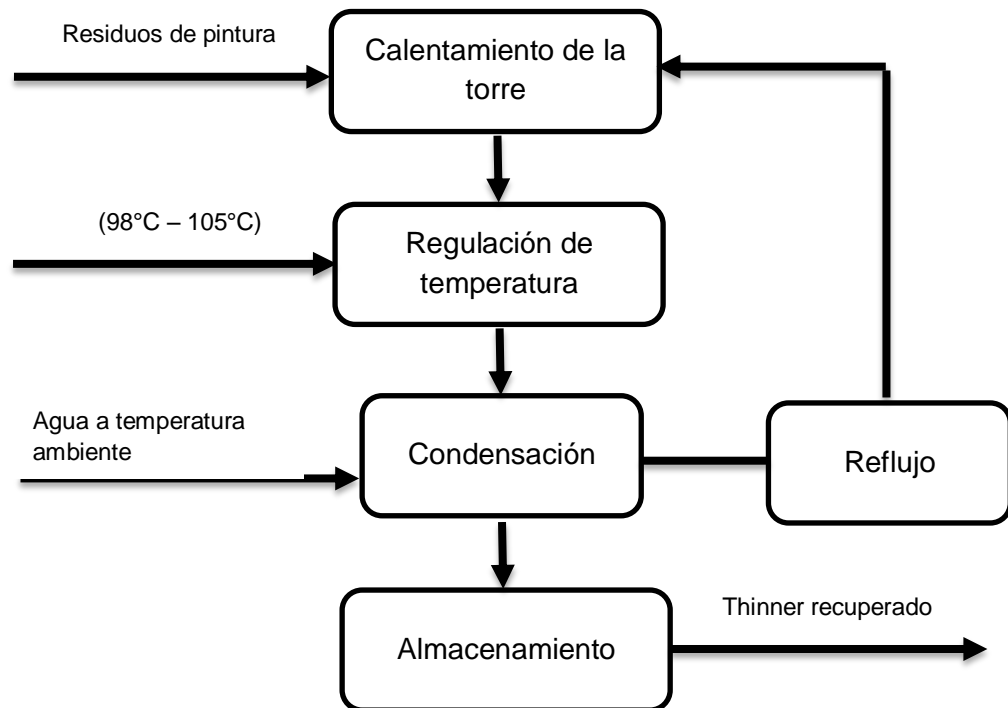
El vapor que se produce asciende por la columna, luego sale por la parte superior y se condensa. Una fracción del condensado se separa como producto de cabeza. La otra parte se reincorpora como reflujo a la columna, por la que desciende en fase líquida.

### **Obtención del producto:**

En esta parte final del proceso se recolecta el producto obtenido en un tanque de almacenamiento, el cual presenta un color un poco amarillento ya que es un thinner reciclado lo

que estamos obteniendo, sus características fisicoquímicas no serán iguales en ningún aspecto debido a lo ya mencionado antes.

*Diagrama del procedimiento de la Destilación de Thinner sin el Sistema de Enfriamiento*



**Gráfica 5-3:** Proceso de destilación de Thinner.  
Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

### 3.3.2 Toma de datos del equipo actual

Se realizaron pruebas con el fin de recolectar datos para el futuro diseño del sistema de enfriamiento, se tomó apuntes en base a la petición de la persona encargada de construir el equipo, nos pidió datos sobre caudal del producto recuperado y temperatura de condensación.

Para sacar datos exactos se realizó cuatro prácticas en el laboratorio de Operaciones Unitarias con una duración de cinco horas por práctica, se alimentó el tanque del equipo con 12L de residuo de pinturas. En cada prueba se obtenía un valor diferente para lo cual hicimos una media de todas las cifras conseguidas y así tener datos más exactos.

A continuación presentamos datos del funcionamiento que presenta el equipo:

**Tabla 20-3:** Datos experimentales del caudal del producto y temperatura de condensación.

n	T° Condensación m(°C)	Q (ml/h)
1	24	198
2	22	200
3	22	200
4	21	200
Total	22	200

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

### 3.3.3 Proceso de Destilación de thinner con la Implementación del Sistema de Enfriamiento



**Figura 4-3:** Sistema de Enfriamiento.

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

#### **Alimentación:**

Se llena el tanque de alimentación por medio de una manguera hasta un 80 % de su capacidad.

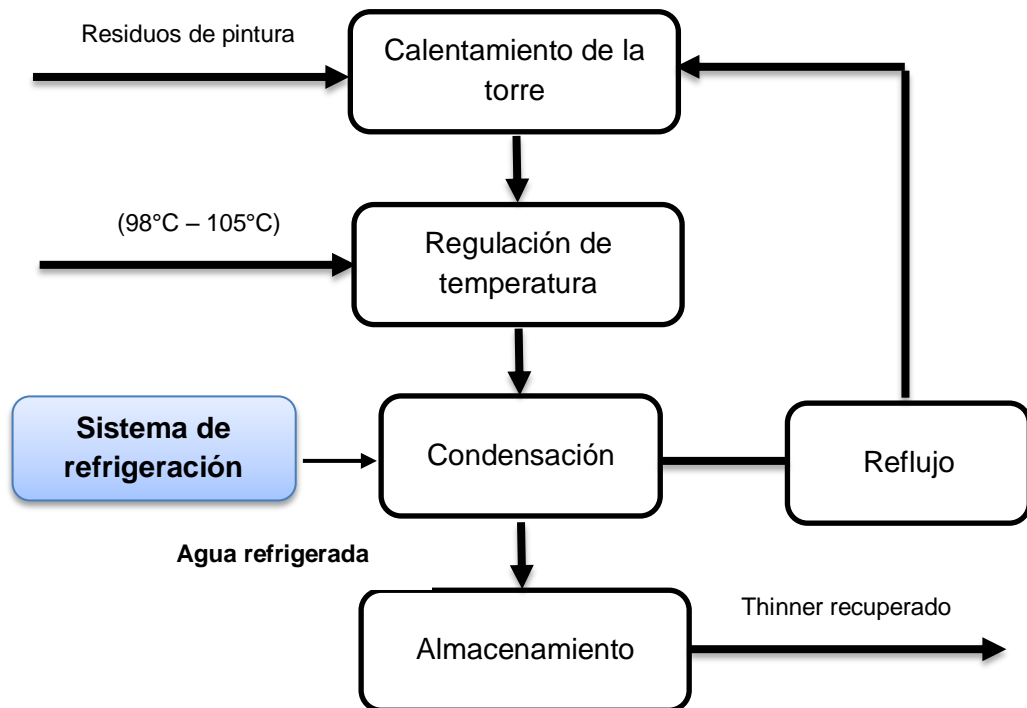
#### **Regulación de la temperatura:**

En este paso se programa el equipo a la temperatura que queremos mantener el agua que va recircular por los condensadores, será medido por medio de un sensor.

### Recirculación:

El agua previamente enfriada pasara por los condensadores arrastrando el calor del vapor de thinner y haciendo que este se condense y pueda llegar hasta el tanque de almacenamiento.

*Diagrama del procedimiento de la Destilación de Thinner con el Sistema de Enfriamiento*



**Gráfica 6-3** Proceso de destilación de Thinner con el sistema de enfriamiento.

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

### ***3.3.4 Instrucciones para el uso del equipo de sistema de enfriamiento***

Antes de poner a funcionar el equipo se debe asegurar que este correctamente instalado, tomando ciertos aspectos importantes:

- El equipo debe estar sobre una superficie plana.
- La conexión eléctrica debe estar cerca del equipo y debe ser de 110 V.
- Asegurarse que las conexiones de tuberías que llevan agua para su recirculación no tengan fugas.
- Se debe asegurar que todos los componentes del equipo estén buenas condiciones y en su lugar.
- Antes de usar el sistema de enfriamiento se debe tomar en cuenta la preparación adecuada del mismo.

Luego de haberse asegurado que la instalación del equipo es totalmente correcta se lo puede poner en marcha siguiendo los siguientes pasos:

- Llenar el tanque de almacenamiento de agua a un 80 % de su capacidad.
- Abrir la llave de paso de agua para la recirculación.
- Abrir el tablero de control y verificar que sistema eléctrico se encuentre correctamente.
- Encender el equipo girando la perilla del botón BY PASS en dirección ON.
- Digitalizar en el tablero de control, la temperatura deseada para el proceso con el que se vaya a trabajar.
- Ubicar el controlador de temperatura en el agua del tanque de evaporación.
- Encender la unidad de enfriamiento para la preparación anticipada del equipo, esto tomará de 1 a 2 horas en enfriar el agua hasta la temperatura que se ha indicado en el tablero de control.
- Una vez alcanzada la temperatura indicada encender la bomba y dejar recircular el agua.
- Cada cierto tiempo monitorear que el proceso sea el correcto.
- Al finalizar la práctica apagar el sistema de enfriamiento, la bomba y el sistema de control.
- Desconectar el tomacorriente del equipo.
- Dejar reposar cierto tiempo el agua congelada para que vuelva a estado líquido.

- Vaciar el tanque de evaporación para evitar que el equipo sufra de efectos corrosivos.
- Lavar y limpiar el equipo con mucho cuidado de no golpear o dañar los componentes del mismo.

Siguiendo los pasos se garantiza pruebas óptimas con buenos resultados. Además con la utilización correcta del equipo se evitará accidentes para el personal que lo maneja y también se mantendrá la funcionalidad y durabilidad del sistema de enfriamiento.

### 3.3.5 Validación del equipo

*Comparación de las variables obtenidas mediante cálculos de ingeniería vs. Datos reales obtenidos en el laboratorio*

- ✓ **Thinner obtenido antes de la implementación del sistema de enfriamiento.**

$$Q_i = \frac{V_1}{t}$$

**Dónde:**

**Q<sub>i</sub>** = Caudal, l/h.

**V<sub>1</sub>**= Volumen obtenido antes de la implementación del sistema de enfriamiento, l.

**t** = Tiempo, h.

$$Q_i = \frac{3}{15}$$

$$Q_i = 0,20 \frac{l}{h}$$

- **Thinner obtenido después de la implementación del sistema de enfriamiento.**

$$Q_f = \frac{V_2}{t}$$

**Dónde:**

**Q<sub>f</sub>** = Caudal, l/h.

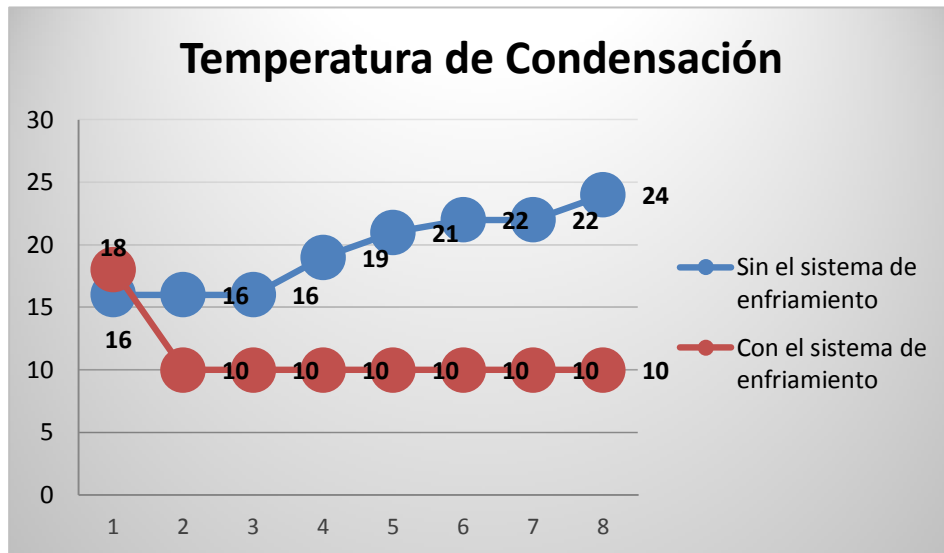
**V<sub>2</sub>**= Volumen obtenido después de la implementación del sistema de enfriamiento, l.

**t** = Tiempo, h.

$$Q_f = \frac{9}{15}$$

$$Q_f = 0,60 \frac{l}{h}$$

- ✓ **Comparación de la temperatura de condensación con el sistema de enfriamiento y sin el sistema de enfriamiento**

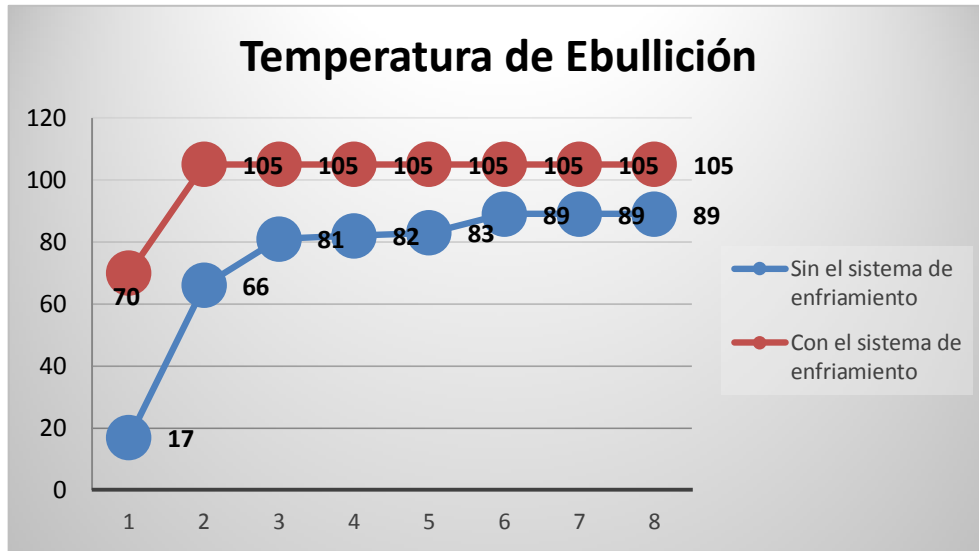


**Gráfica 7-3:** Comparación de la temperatura de condensación SSE vs CSE.  
Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

La grafica 7-3 indica la temperatura de condensación sin el sistema de enfriamiento, misma que alcanzaba un rango que no era el adecuado para que se facilite la condensación del vapor, luego de implementar el sistema de enfriamiento se logró mantener la temperatura a 10°C, esto hizo que los condensadores actúen de mejor manera transformando el vapor a líquido, aumentando la eficiencia del equipo destilador para la obtención del producto deseado.



- ✓ **Comparación de la Temperatura de Ebullición con el sistema de enfriamiento y sin el sistema de enfriamiento**



**Gráfica 8-3:** Comparación de la temperatura de ebullición SSE vs CSE.

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

Como se observa en la gráfica 8-3; la temperatura de ebullición en la verificación del equipo, es decir; sin el sistema de enfriamiento llegaba máximo a los 89°C, esto se debía a que el destilador se encontraba tapado impidiendo que el vapor suba a los condensadores ocasionando fallos en equipo, por ende, pérdidas del producto de alimentación y por varias horas de espera no conseguir el producto deseado.

Al conocer este inconveniente se procedió a dar limpieza al destilador para luego implementar el sistema de enfriamiento al mismo, con esto se consiguió aumentar la temperatura de ebullición y hacer que se genere vapor a mayor temperatura en menor tiempo hacia los condensadores, mismos que intervienen para que ese vapor se condense y pueda ser recuperado como thinner líquido recuperado.

### 3.3.6 Eficiencia del proceso de destilación con y sin la implementación del sistema de enfriamiento

- ✓ **Eficiencia de la torre de thinner sin el sistema de enfriamiento**

$$\text{Eficiencia torre de thinner} = \frac{V_{\text{obtenido}}}{V_{\text{alimentado}}} * 100$$

**Dónde:**

$V_{obtenido}$  = Volumen obtenido de thinner en el proceso de destilación  
 $V_{alimentado}$  = Volumen alimentado de thinner en el proceso de destilación

$$\text{Eficiencia torre de thinner} = \frac{3}{12} * 100$$

$$\text{Eficiencia torre de thinner} = 25 \%$$

El tiempo de trabajo tomado para la maquina ha sido de 15 horas, por lo que se obtuvo una eficiencia del 25 % sin el sistema de enfriamiento, con un volumen de alimentación de 12 litros y un volumen obtenido de 3 litros en dicho periodo de tiempo.

✓ **Eficiencia de la torre de thinner con el sistema de enfriamiento**

$$\text{Eficiencia torre de thinner} = \frac{V_{obtenido}}{V_{alimentado}} * 100$$

**Donde:**

$V_{obtenido}$  = Volumen obtenido de thinner en el proceso de destilación  
 $V_{alimentado}$  = Volumen alimentado de thinner en el proceso de destilación

$$\text{Eficiencia torre de thinner} = \frac{9}{12} * 100$$

$$\text{Eficiencia torre de thinner} = 75 \%$$

El tiempo de trabajo tomado para la maquina ha sido de 15 horas, por lo que se ha obtenido una eficiencia del 75 % con el sistema de enfriamiento, con un volumen de alimentación de 12 litros y un volumen obtenido de 9 litros en dicho periodo.

### 3.3.7 Análisis y discusión de resultados de la validación del equipo

**Tabla 21-3:** Resultados obtenidos SSE y CSE.

Sin el sistema de enfriamiento			Con el sistema de enfriamiento		
Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad
$\dot{V}$	0,20	l/h	$\dot{V}$	0,60	l/h
Temperatura del agua	22,18	°C	Temperatura del agua	11	°C
Tiempo	15	h	Tiempo	15	h

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

En cuanto a la realización de las pruebas sin el sistema de enfriamiento y con el sistema de enfriamiento se puede observar la diferencia de producto obtenido, en un principio se obtuvo 3L de thinner en 15 horas con una alimentación de 12L, luego de la implementación del sistema de enfriamiento se obtuvo el triple de producto, es decir, se recolectó 9L de thinner en el mismo periodo de tiempo.

El sistema de enfriamiento aumento considerablemente la eficiencia en un 75 % y el rendimiento en un 40 % de la torre de destilación de thinner, los valores obtenidos dan como resultado menor consumo de energía y un considerable ahorro de agua.

Se observó que el thinner obtenido antes y después del sistema de enfriamiento presentaba diferente coloración debido a las impurezas, pero esto también fue mejorado, se obtuvo thinner de menor color e impurezas. Esta diferencia se la puede apreciar en el ANEXO H.

### 3.4 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria

Los materiales elegidos, deberán resistir los efectos de la corrosión y tener la capacidad de soportar la temperatura y presión de proceso en que se trabaje. La buena selección de materiales permite ahorrar costos de mantenimiento.

Debido a que en el tanque cilíndrico se posará el agua que necesite el sistema de enfriamiento en cualquier proceso que sea utilizado, estará expuesto a diferentes esfuerzos térmicos y mecánicos, se decidió que para su construcción se hará uso del Acero Inoxidable AISI 304, material que garantiza protección y resistencia para la elaboración de este tipo de equipos.

✓ Acero Inoxidable AISI 304.

El tipo 304 es un acero inoxidable austénico bajo en carbono 18-8 cromo-níquel de gran uso, es el tipo de compuesto más utilizado en la industria. Ofrece gran resistencia a la corrosión, altas y bajas temperaturas, además de ser un material de larga vida útil, condiciones que garantizan que el equipo pueda soportar tiempos de operación de 24 horas o más, dependiendo de la cantidad de producto que se desee obtener.

**Tabla 22-3:** Composición del acero inoxidable.

Elemento	Tipo 304
Carbón	0.07 máx.
Manganeso	2.00 máx.
Azufre	0.030 máx.
Fósforo	0.045 máx.
Silicio	0.75 máx.
Cromo	17.5 a 19.5
Níquel	8.0 a 10.5
Nitrógeno	0.10 máx.

**Fuente:** (NORMA ASTM).

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

✓ Serpentín de Cobre

El siguiente punto será hacer el cálculo para el diámetro y longitud del serpentín que se encontrará en el interior del cilindro o también llamado tanque de almacenamiento de agua; el material utilizado para el serpentín será de cobre (Cu).



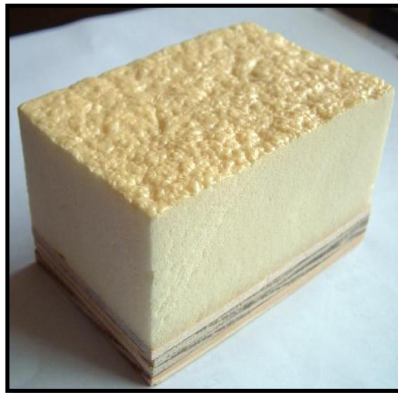
**Figura 5-3: Serpentín de Cobre.**

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

Los serpentines de tubo de cobre han sido utilizados por muchos años, son los más confiables, de mejor desempeño y fáciles de reparar. A través de los años se ha empleado variedad de mejoras, diseños y separaciones de los tubos para mejorar la transferencia de calor. Estos tipos de serpentines se los encuentra en la mayoría de equipos existentes y disponibles en todos los fabricantes, otra de las ventajas que presenta es que no requieren inversión demostrado que duran por décadas. En los últimos se han incrementado los problemas con cierto tipo de corrosión, pero de todos los materiales con los que son fabricados los serpentines, el cobre es el más resistente. (Luvata, 2016, p.2)

#### ✓ Selección del tipo de Aislante Térmico

Para que no exista pérdida de calor en el interior y exterior del tanque se cubrirá el mismo con un aislante térmico. Este aislante será poliuretano y tendrá un espesor de 10 cm el cual cubrirá toda el área de tanque.



**Figura 6-3:** Aislante Térmico Poliuretano.  
Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

Se escogió el Poliuretano como aislante térmico para nuestro equipo ya que presenta un sistema adherido continuo e impermeable, importante para evitar humedades, paso de aire, pérdida de calor y energía que se produce en el proceso.

Las espumas de poliuretano para aislamiento térmico se obtienen a través de un proceso en donde hay lugar de reacción química exotérmica de dos componentes; polioliol e isocianato, que simultáneamente con un agente expándete, dan lugar a un material rígido como lo es la espuma de poliuretano, utilizada en muchos campos de industriales. (Madera, 2007, p.10)

### ✓ Selección del Refrigerante

Para obtener un mejor resultado en el sistema de enfriamiento, se hará uso de un refrigerante, esto permitirá mejorar la eficiencia, el rendimiento del equipo y por ende economizar costos.

El refrigerante se debe seleccionar según la unidad a trabajar, los valores de refrigeración van de 0.5, 0.75 y 1, cada uno respectivamente según su capacidad de refrigeración. Para nuestro proyecto técnico se escoge la unidad  $\frac{3}{4}$  por su excelente capacidad de refrigeración, el siguiente punto es determinar que refrigerante de los existente en el mercado utilizar, para esto debemos tener en cuenta el costo, beneficio y de ser posible el que presente menor contaminación hacia al ambiente.

Entre los refrigerantes investigados y recomendados para emplearlo en nuestro proyecto son; R-134<sup>a</sup>, R-404<sup>a</sup>. Haciendo un análisis previo de cada tipo de refrigerante se decide utilizar el R-404<sup>a</sup>.

El R-404<sup>a</sup> es una es una mezcla ternaria compuesta por: R-125, R-143A y R-134<sup>a</sup>, gases refrigerantes, con cero agotamiento a la capa de ozono, es decir, amigable con el ambiente, utilizado en equipos de refrigeración de medias y bajas temperaturas (Moreno, 2017, p.30).



**Figura 7-3:** Refrigerante Utilizado – 404<sup>a</sup>.  
**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

#### Características:

- Su toxicidad es baja.
- Pueden rellenarse fácilmente en caso de exista fugas.
- Presenta excelente capacidad frigorífica y eficiencia energética.
- Estabilidad química.

**Tabla 23-3:** Componentes del refrigerante 404<sup>a</sup>.

Nombre químico	% en peso	N°. CE
1,1,1,2- Tetrafluoroetano (R-134a)	4	212-377-0
Pentafluoroetano (R-125)	44	206-557-8
1,1,1-Trifluoroetano (R-143a)	52	206-996-5

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 24-3:** Propiedades Físicas del Refrigerante 404<sup>a</sup>.

PROPIEDADES FISICAS	Unidad	404A
Peso molecular	g/mol	97.61
Temperatura de ebullición	°C	-46.45
Deslizamiento temperatura de ebullición	K	0.7
Temperatura critica	°C	72.07
Presión critica	bar abs	37.31
Densidad critica	Kg/m <sup>3</sup>	484
Densidad del líquido 25°C	Kg/m <sup>3</sup>	1048
Densidad del líquido -25°C	Kg/m <sup>3</sup>	1236
Densidad del vapor saturado	Kg/m <sup>3</sup>	5.41
Presión de vapor 25°C	bar abs	12.42
Presión de vapor -25°C	bar abs	2.49
Calor latente de vaporización	KJ/Kg	200
Calor específico del líquido	KJ/Kg K	1.64
Calor específico del vapor	KJ/Kg K	0.88
Conductividad térmica de líquido	W/m <sup>2</sup> k	0.064
Conductividad térmica de vapor	W/m <sup>2</sup> k	0.0143
Solubilidad del agua	Ppm	Despreciable
Límite de inflamabilidad	% vol	ninguno
Toxicidad	Ppm	1000

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

### 3.5 Análisis de costos/ beneficio del proyecto

#### 3.5.1 Costos de thinner recuperado

$$\text{Costo de thinner recuperado} = \frac{\text{Gastos (\$)}}{\text{Volumen de producción}}$$

$$\text{Gastos (\$)} = \text{GLP} + \text{agua} + \text{energía eléctrica}$$

$$\text{Gastos (\$)} = 3 + 2 + 2$$

$$\text{Costo de thinner recuperado} = \frac{7}{9}$$

$$\text{Costo de thinner recuperado} = 0,7 \frac{\$}{\text{L}}$$

El costo del thinner en el mercado es de 1,30 \$/L por lo que se tiene:

$$\text{Ganancia} = \text{Costo del thinner en el mercado} - \text{Costo del thinner recuperado}$$

$$\text{Ganancia} = 1,30 - 0,77$$

$$\text{Ganancia} = 0,53 \frac{\$}{\text{L}}$$



### 3.5.2 Costos de inversión

- Recursos materiales

**Tabla 25-3:** Materiales para tanque de acero 304.

Denominación	Cantidad	Costos de construcción (\$)
Acero inoxidable 304	1,75 m <sup>2</sup>	250
Poliuretano	0,045 m <sup>3</sup>	150
Suelda	1	80
Suelda de plata al 5 %	1	30
	<b>TOTAL</b>	<b>\$510</b>
<b>ACCESORIOS</b>		
Filtro deshidratador ¼ de tuerca	1	30
Control de frio	1	120
Tubería de cobre de 25mm	5,09 m	110
Tubería de cobre de 35mm	7,69 m	150
Válvula de expansión	1	90
Tubería ½	3m	4
Codos ½	7	5
Te ¾	1	1
Válvula de pie ¾	1	6
Buchin ¾	1	2
Rollo de teflón	2	2
Llave de paso ¾ de bola	2	15
Llave universal ¾	1	2,50
Adaptadores ½	2	1
Reducciones ¾ a ½	3	2
Manguera ½	7m	7
Enchufe	1	1
Abrazaderas ½	2	1
Abrazaderas ¾	2	1
Contactor LC bobina	2	22
Bobina LC para MC10	2	12
Relé térmico MC22B	1	20

Relé térmico MC18B	1	20
Pulsador luminoso MT32	2	6
Pulsador luminoso MT32	2	6
Cajetín metálico liviano	1	25
Riel DIM	1	2
Breaker MT512E	2	10
Cable concéntrico	5	10
Plastic Strech	1	12
<b>TOTAL</b>		<b>\$696,50</b>

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 26-3:** Equipos.

Unidad de enfriamiento	1	320
Bomba	1	80
Compresor	1	150
<b>TOTAL</b>		<b>\$550</b>

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

**Tabla 27-3:** Químicos.

Refrigerante 404 <sup>a</sup>	1	200
<b>TOTAL</b>		<b>\$200</b>

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

## ✓ Recursos humanos

**Tabla 28-3:** Mano de obra.

Mano de obra	500
Planos en 3D de los Equipos.	100
Video en 3D de la simulación del proceso	100
<b>TOTAL</b>	<b>\$700</b>

**Realizado por:** Freire, S y Reinel, A. 2018.

✓ **Costos operativos**

**Tabla 29-3:** Costos para operación del equipo.

TRANSPORTE Y MOVILIZACION		
Movilización	2	150
Transporte del equipo		250
ALIMENTACIÓN DE LA TORRE		
Residuos	36	130
	<b>TOTAL</b>	<b>\$530</b>

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

- **Costo total del proyecto**

**Tabla 30-3:** Recursos totales.

Actividad	Inversión
Recursos materiales	1956,50
Recursos humanos	700
Costos operativos	530
<b>TOTAL</b>	<b>\$3186,50</b>

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018.

Como se puede observar el costo del diseño y construcción de este proyecto es un valor de \$1956,50 en gastos de recursos materiales, \$700 en gastos de recursos humanos y \$530 en gastos de \$530, dando un total de 3186,50 dólares.

### 3.6 Cronograma de ejecución del proyecto

<div><div>TIEMPO</div><div>ACTIVIDADES</div></div>	TIEMPO																											
	1°				2°				3°				4°				5°				6°							
	MES				MES				MES				MES				MES				MES							
	SEMANAS																											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica																												
elaboración del anteproyecto																												
Diagnóstico del estado actual de la torre de destilación.																												
Determinación de variables.																												
Prueba de laboratorio para el diagnóstico inicial.																												
Dimensionamiento del equipo.																												
Construcción de los elementos a implementar.																												
Implementación de los elementos construidos.																												
Validación de los elementos implementados.																												
Estudio técnico y económico.																												
Redacción del trabajo final																												
Análisis de costos.																												
Revisión del documento final.																												
Defensa de los del proyecto.																												

Realizado por: Freire, S y Reinel, A. 2018

## CONCLUSIONES

- En el diagnóstico del equipo se realizaron cuatro pruebas preliminares, con las cuales se determinó que la torre de destilación de thinner se encontraba trabajando de manera ineficiente, por cada 12 L de alimentación se obtenía 3 litros de thinner en 15 horas de proceso, esto nos da una eficiencia del equipo de 25%.
- Las variables consideradas son: la temperatura y el caudal, que determinan el funcionamiento del equipo, además influye en el modo de operación del sistema de enfriamiento, el cual se necesita implementar para un mejor proceso de destilación.
- Los cálculos para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento fueron realizados en base al requerimiento de la torre de destilación de thinner, con las pruebas de ensayo se determinó trabajar a una temperatura de 10 °C y un volumen de 80L de agua, además se optó por el refrigerante 404<sup>a</sup>, consideraciones que garantizan mejorar el proceso de destilación.
- Se adaptó el sistema de enfriamiento a la torre de destilación de thinner manejando el flujo en contracorriente para la mejor distribución y circulación del agua por los condensadores. Además el sistema de enfriamiento presenta la característica de ser adaptado con otros equipos, la cual permite reducir las altas temperaturas que se genera en diferentes procesos.
- Con la validación del sistema de enfriamiento se obtuvo excelentes resultados, ya que se comprobó un aumento de eficiencia en el proceso de destilación, obteniendo el triple de destilado en el mismo tiempo, es decir se recogió 9 litros de destilado en un tiempo de 15 horas.

## RECOMENDACIONES

- Antes de encender la torre de destilación de thinner se aconseja prender el sistema de enfriamiento unos minutos antes para poder programar la temperatura con la que se va trabajar.
- La bomba puede trabajar solo por un tiempo de 45 minutos, luego de eso dejar descansar 15 minutos y volver a encender para que el agua siga recirculando.
- El equipo de enfriamiento tiene una capacidad de 100L, pero solo se debe llenar hasta un 80 %, con esto se puede evitar que el agua no caiga del tanque que la contiene al poner en funcionamiento y manipular el equipo para poder trabajar de una manera segura.
- Una vez terminada la práctica vaciar el tanque de agua para evitar el deterioro del equipo, ya que el agua podría causar la corrosión acelerada de las partes que componen el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **McCabeE, W., Smith, J. y Harriot, P.** *Operaciones unitarias de ingeniería*. Nueva York : McGraw – Hill., 2001.
2. **Jerés.** *Ingenieria de servivios*. [En línea] 2008. [Citado el: 28 de 01 de 2018.] <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:nsmnrrCV2OYJ:https://termoelias.files.wordpress.com/2008/08/2-2-3-sistemas-de-enfriamiento-de-agua.doc+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=ec>.
3. **INEN.** *Medidas de volumen. Errores máximos permitidoS*. Quito, Ecuador : s.n., 12 de 2015.
4. **Caballero. M, Santos. L.** Diseño de un sistema de recirculación y enfriamiento. [En línea] 2, 2012. [Citado el: 25 de 03 de 2018.] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263125299021>.
5. **Dávila, M.** BVS. *BIREME*. [En línea] 3, 2014. [Citado el: 21 de 04 de 2018.] <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nxtAction=lnk&exprSearch=154085&indexSearch=ID>.
6. **España, MSSSI.** ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos. *Cuidados-salud*. [En línea] [Citado el: 20 de 02 de 2018.] [https://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/4\\_leg.pdf](https://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/4_leg.pdf).
7. **Geankopolis, J.** *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3. Chile : CECSA, 2003. págs. 85-98.
8. **Hélix.** Ciencia y Desarrollo. *Ciencia y Desarrollo*. [En línea] 1, 13 de 06 de 2013. [Citado el: 16 de 02 de 2018.] <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/266/articulos/editorial.html>.
9. **Jaramillo, O.A.** CIE-UNAM. [En línea] 2007. [Citado el: 10 de 04 de 2018.] <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>.
10. *Relaciones termicas en el sistema suelo-planta-atmosfera durante la incidencia del fenomeno de enfriamiento o helada*. **José Sergio Barrales Domínguez, Manuela Muñoz.** s.l. : Sistemas termicos, 2002, UAEM Redalyc, págs. 289-297.

11. **Kern, D.** *Procesos de Transferencia de Calor*. México : Compañía Editorial Continental, 1999. págs. 19-35.
12. **Muller, E.** *Termodinamica Basica*. 3. Sevilla : Consultora Kemiteknik C.A., 2002.
13. **PAUCAR, K.** *Diseño y Construcción de una Torre de Enfriamiento de*. Lima, Perú : s.n., 1999.
14. **RESTREPO, J.** Diseño Operacional de un Sistema de Enfriamiento. [En línea] 2011. [Citado el: 13 de 01 de 2018.] <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/142022.pdf>.
15. **VALIENTE, A.** *Problemas de Transferencia de Calor*. México : Editorial Limusa, 1994. págs. 48-63.
16. **Viguer, J.** *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Segunda. ESPAÑA : McGRAW-HILL, 2001.
17. Libro IV Anexo 1. [En línea] [Citado el: 06 de 11 de 2017.] <http://www.industrias.ec/archivos/CIG/file/CARTELERA/Reforma%20Anexo%2028%20feb%202014%20FINAL.pdf>.
18. **Nestle Ecuador S.A.** Politicas Nestle medio ambiente. [En línea] 29 de septiembre de 2004. [Citado el: 18 de FEBRERO de 2018.] <https://empresa.nestle.es/es/libreria-documentos/Documents/publicaciones/politica-nestle-medio-ambiente.pdf>.
19. **Rafael, Ortiz.** Ingeniería Química. [En línea] 20 de Marzo de 2014. [Citado el: 17 de Octubre de 2017.] <http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/5-desafios-ingenieria-quimica>.
20. **Aztictenalia.** ISSU. *Sostenibilidad Alimentaria*. [En línea] 5 de JULIO de 2010. [Citado el: 18 de Febrero de 2018.] [https://issuu.com/aztitecnalia/docs/sostenibilidad\\_alimentaria](https://issuu.com/aztitecnalia/docs/sostenibilidad_alimentaria).
21. **Cengel, Y.A.** *Introducción a la Termodinamica*. Sexta. California : Mc Graw-Hill, 1996.
22. **C., Mataix.** *Mecaniuca de fluidos y Maquinas Hidraulicas*. Sexta. México : Pearson, 2002.
23. **Leon, Juan Manuel.** *Diseño y Cálculo de recipientes a presión*. Segunda. Bogota : Inglesa, 2001.

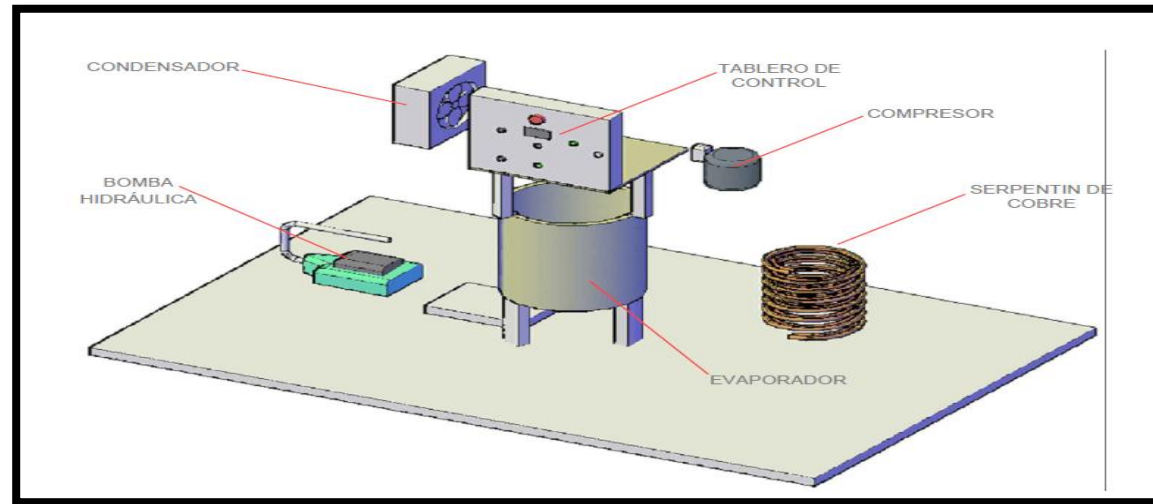


24. **Coulson, John, Richardson, J. y Backhurst J.** *Ingeniería Química*. Segunda. Barcelona : Reverté S.A, 1981. págs. 112-133.
25. **A., Cardenas.** aulavirtualpfcicq. [En línea] 2015. [Citado el: 18 de 12 de 2017.]
26. **Badger, W. y Banchemo, J.** *Introducción a la Ingeniería Química*. Segunda. Estados Unidos : McGraw – Hill, 1970. págs. 15-105.
27. **Burbano, Sonia.** *Diseño de un modulo de intercambiador de calor de coraza Y*. Tercera, Bogotá, Colombia : s.n., 2014.
28. **Bustamante, Christian.** *Optimizacion de un sistema de enfriamiento para molino de rodillos*. 2015.
29. **Holman, J.** *Transferencia de Calor*. 2. España : McGraw – Hill, 1998. págs. 89-114.
30. **J., Ruales.** Sistemas de Enfriamiento - definiciones importantes. [En línea] 2007. [Citado el: 06 de 11 de 2017.] <https://www.definicionabc.com/medio-ambiente/aguas-residuales.php>.
31. **Mendoza, Jhon.** *Prototipo de un sistema de Enfriamineto de tiro inducido en contraflujo*. Guayaquil, Ecuador : Mendoza, 2016.
32. **Audelo, J.** Diseño y construccion de una camara de niebla. [En línea] 2017. [Citado el: 11 de mayo de 2018.] <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6529/1/96T00375.pdf>.

## ANEXOS

### Anexo A

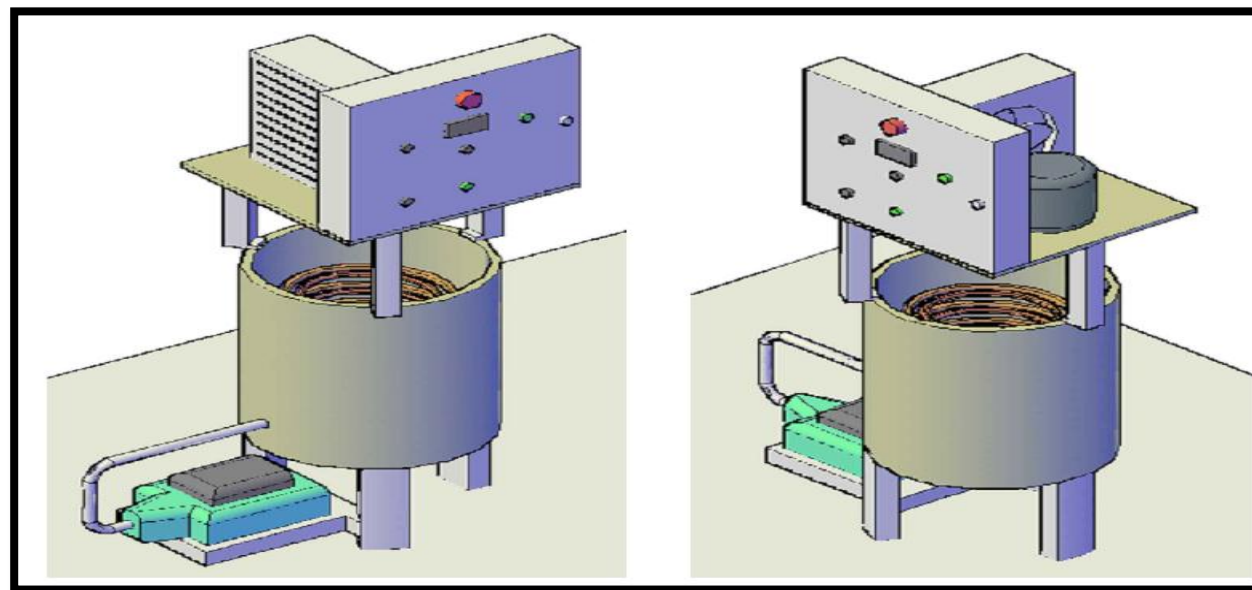
a)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH”		
			ESCALA	FECHA	LAMINA
<ul style="list-style-type: none"> <li>Partes del sistema de refrigeración</li> </ul>	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinell	1:1	09/05/2018	1

## Anexo B

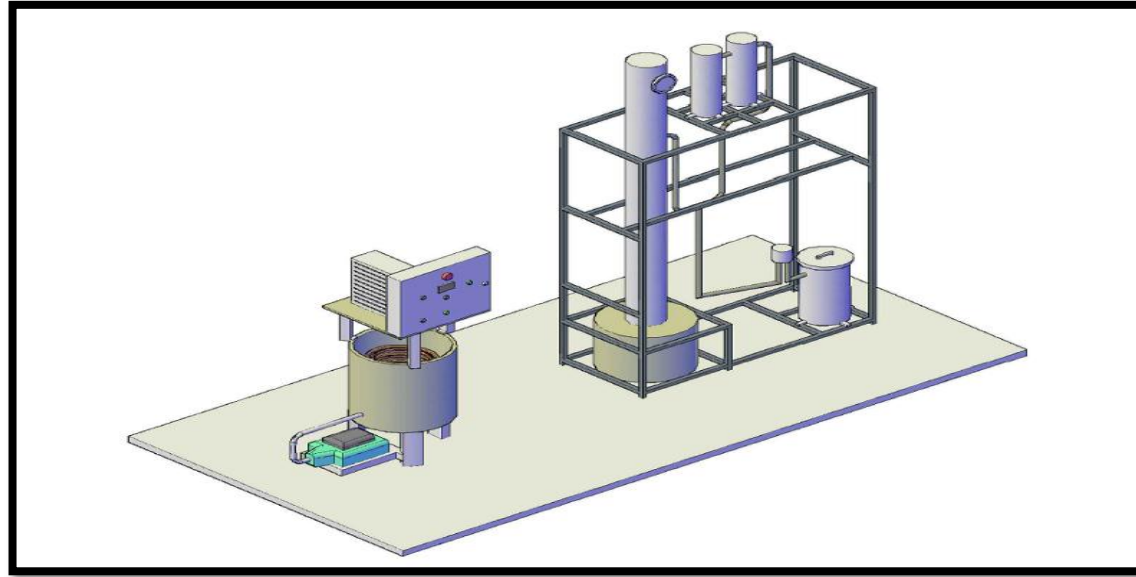
a)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH”		
a) Sistema de refrigeración completo	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinol	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	09/05/2018	1

## Anexo C

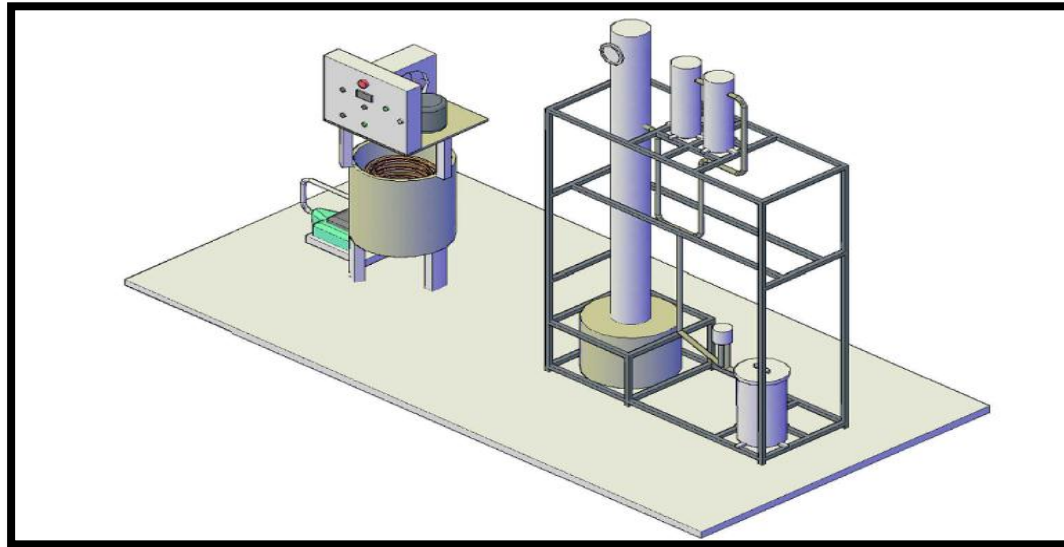
a)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH”		
			ESCALA	FECHA	LAMINA
a) Visualización 3D – Vista lateral izquierda	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinél	1:1	09/05/2018	1

## Anexo D

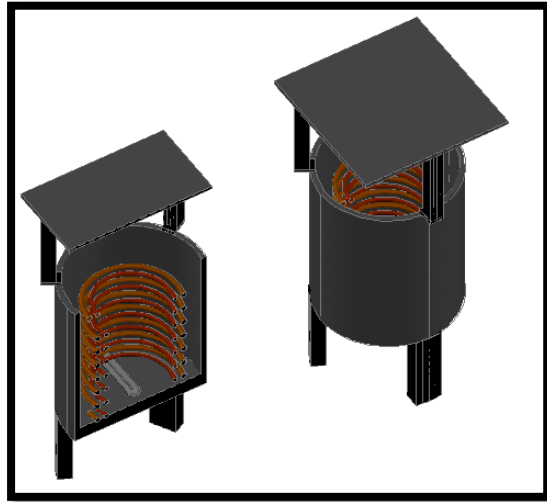
a)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH		
			ESCALA	FECHA	LAMINA
a) Visualización 3D – Vista lateral derecha	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinel	1:1	09/05/2017	1

## Anexo E

a)



b)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH		
a) Visualización 3D b) Equipo vista frontal	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinel	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	09/05/2017	1

## Anexo F

a)



b)



c)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH		
a) Condensador b) Panel de control c) Compresor	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinel	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	09/05/2017	1



## Anexo G

a)



b)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH		
a) R404A b) Residuos de thinner	c) Por aprobar d) Por calificar e) Por certificar	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinel	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	09/05/2017	1



## Anexo H

a)



b)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA CON FLUJO EN CONTRACORRIENTE PARA LA TORRE DE DESTILACIÓN DE THINNER DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESPOCH		
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Destilado SSE</li> <li>✓ Destilado CSE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Por aprobar</li> <li>✓ Por calificar</li> <li>✓ Por certificar</li> </ul>	Elaborado por: Sergio Freire Andrés Reinell	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	09/05/2017	1

## INFORMACION DE PANEL DE CONTROL



INFORMACIÓN DE COMANDOS DE CONTROL PARA EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	
	DESCRIPCIÓN:
<b>PARO DE EMERGENCIA:</b>	Esta función sirve para prevenir situaciones que puedan poner en peligro a las personas, para evitar daños en el equipo o en trabajos en curso o para minimizar los riesgos ya existentes, se activa rápidamente al presionarlo.
<b>ON/OFF SISTEMA REFRIGERANTE:</b>	Esta perilla sirve para activar el sistema de refrigeración, esto hace que el equipo cumpla con la función de refrigerar al subir la temperatura en el proceso utilizado.
<b>ON/OFF BOMBA:</b>	Perilla que sirve para activar la bomba, con esto se genera el bombeo de agua hacia la altura deseada del destilador de thinner y por ende se da el proceso de recirculación de agua.

<b>BY PASS:</b>	Da el paso para todo el funcionamiento del equipo. Al no estar activada esta perilla, por más de que la otras perillas estén activadas el equipo no encenderá, esto nos permitirá revisar que el proceso se produzca de forma correcta.
<b>CONTROLADOR:</b>	Dispositivo eléctrico que permite controlar las variables con las que va a trabajar en el proceso, principalmente tiempos y temperaturas. Para hacer uso de esto se deberá hacer uso de su respectivo manual.
<b>LLAVE DEL PANEL DE CONTROL:</b>	Es una herramienta que nos permite abrir el panel de control para realizar correcciones del sistema eléctrico. Se recomienda que para hacer estas correcciones lo haga personal capacitado.

## **Anexo J**

# **TECNICA DE LABORATORIO**

## **PRÁCTICA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR**

### **INFORME N°**

#### **TEMA:**

#### **Objetivos**

- *General*
- *Específicos (mínimo 3)*

#### **Marco Teórico Referencial**

- *Marco Teórico*
- *Marco Referencial*

#### **Parte Experimental**

- *Sustancias y Reactivos*
- *Agua*

#### **Materiales y Equipos**

- *Sistema de enfriamiento*

#### **Procedimiento**

- Llenar el tanque de almacenamiento de agua a un 80 % de su capacidad.
- Abrir la llave de paso de agua para la recirculación.
- Abrir el tablero de control y verificar que sistema eléctrico se encuentre correctamente.
- Encender el equipo girando la perilla del botón BY PASS en dirección ON.
- Digitalizar en el tablero de control, la temperatura deseada para el proceso con el que se vaya a trabajar.
- Ubicar el controlador de temperatura en el agua del tanque de evaporación.
- Encender la unidad de enfriamiento para la preparación anticipada del equipo, esto tomará de 1 a 2 horas en enfriar el agua hasta la temperatura que se ha indicado en el tablero de control.
- Una vez alcanzada la temperatura indicada encender la bomba y dejar recircular el agua.
- Cada cierto tiempo monitorear que el proceso sea el correcto.
- Al finalizar la práctica apagar el sistema de enfriamiento, la bomba y el sistema de control.

- Desconectar el tomacorriente del equipo.
- Dejar reposar cierto tiempo el agua congelada para que vuelva a estado líquido.
- Vaciar el tanque de evaporación para evitar que el equipo sufra de efectos corrosivos.
- Lavar y limpiar el equipo con mucho cuidado de no golpear o dañar los componentes del mismo.

### Datos

- Datos Experimentales:

**TABLA 4.1-1**  
**DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

VARIABLES	UNIDADES	VALORES
$T_1$	°C	
$T_2$	°C	
Q	L/s	
$t_1$	°C	-25
$t_2$	°C	8

FUENTE: APELLIDO, Nombre, Lab. Ope. Unit., ESPOCH 2018

### Cálculos y Resultados

- Datos Adicionales:

**TABLA 5.1-1**  
**DATOS ADICIONALES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

UNIDADES	R404A	AGUA
$\dot{m}$ (Kg/h)	578,71	79,98
Densidad(Kg/m <sub>3</sub> )	12.77	998
C <sub>p</sub> (KJ/KgK)	0.8674	4,180
C <sub>min</sub> (KJ/hK)	334,32	
C <sub>D</sub> (KJ/hK)	503,48	

FUENTE: APELLIDO, Nombre, Lab. Ope. Unit., ESPOCH 2018

- Cálculos Específicos:

- ❖ Flujo térmico transferido desde el agua al refrigerante

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

- ❖ Calculo del compresor

$$W = h_2 - h_1$$

- ❖ Calculo del condensador

$$Q_H = h_2 - h_3$$

- ❖ Calculo del evaporador

$$Q_L = h_1 - h_4$$

- ❖ Calculo del COP real

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{entra}}$$

- ❖ Capacidad de refrigeración por unidad de tiempo

$$\dot{Q}_{evaporador} = \dot{m}_{refrigerante} * q_{evaporador}$$

- ❖ Potencia del compresor

$$\dot{W}_{compresor} = \dot{m}_{refrigerante} * W_{compresor}$$

- ❖ Calculo del COP ideal

$$COP_I = \frac{\dot{Q}_{evaporador}}{\dot{W}_{compresor}}$$

- ❖ Cálculo de la transferencia máxima de calor.

$$Q_{\text{máx}} = C_{\text{min}} * (T_1 - t_1)$$

- ❖ Determinación de la transferencia de calor real.

$$Q = C_D (T_1 - T_2)$$

- ❖ Cálculo de la eficiencia térmica

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\text{máx}}}$$

### 1.1 Resultados

**Tabla 5.3-1**  
**Resultados del Sistema de Refrigeración**


FUENTE: APELLIDO, Nombre, Lab. Ope. Unit., ESPOCH 2018

## 5 Errores

5.2 Sistemáticos:

5.3 Aleatorios:

## 6 Discusión (120 palabras)

## 7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones:

7.2 Recomendaciones:

## 8 Aplicaciones

## 9 Referencias Bibliográficas

9.1 Citas:

9.2 Bibliografía:

9.3 Internet:

## **10 Cuestionario**

## **11 Anexos**

11.1 Diagrama del Equipo Utilizado.

**RESUMEN** (150 palabras)

**DESCRIPTORES**